МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 740

А. А. ВОЛОДИН

ЭЛЕКТРОННЫЕ МУЗЫКАЛЬНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ



«ЭНЕРГИЯ»

МОСКВА 1970

6Ф2.7
В 68
УДК 681.828.3

А. А. Володин

В 68 Электронные музыкальные инструменты, М., «Энергия», 1970.

144 стр. с илл. (Массовая радиобиблиотека, вып. 740).

Рассматриваются принципы конструирования электронных музыкальных инструментов. Кратко изложены основы теории музыкального звука.

Книга рассчитана на радиоспециалистов и квалифицированных радиолюбителей, работающих в области конструирования электронных музыкальных инструментов.

3-4-5
333-70 **6Ф2.7**

ВОЛОДИН АНДРЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ
ЭЛЕКТРОННЫЕ МУЗЫКАЛЬНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ

Редактор *Е. П. Овчаренко*
Обложка художника *А. А. Иванова*
Технический редактор *Г. Г. Самсонова*
Корректор *Р. К. Шилова*

Сдано в набор 25/XII 1969 г. Подписано к печати 19/V 1970 г. Т-06365
Формат 84×108 1/32 Бумага типографская № 1
Усл. печ. л. 7,56 Уч.-изд. л. 10,57
Тираж 40 000 экз. Цена 46 коп. Зак. 1009

Издательство „Энергия". Москва, Ж-114, Шлюзовая наб., 10.

Московская типография № 10 Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР.
Шлюзовая наб., 10.

ПРЕДИСЛОВИЕ

За последние годы значительно повысился интерес к электронным музыкальным инструментам (ЭМИ), работы по которым, начатые еще в 20-х годах нашего столетия, в известной мере вышли теперь за рамки поискового и опытного этапа. В настоящее время промышленное производство ЭМИ существует уже в ряде стран с высоким уровнем техники (СССР, ГДР, США, Япония, Англия и др.). В качестве инструментов с новыми звучаниями ЭМИ привлекают внимание композиторов, активно проникают в эстрадную музыку и завоевывают симпатии музыкальной общественности.

Как объект технического творчества, ЭМИ все больше привлекают к себе радиоспециалистов и радиолюбителей.

Развитие ЭМИ не лишено своих трудностей и противоречий. Уже с первых шагов ЭМИ показали очевидные возможности расширения диапазона звучаний и некоторые другие преимущества по сравнению с классическими музыкальными инструментами. Вместе с тем особенности электронного звукообразования в тех случаях, когда они неправильно учитываются или не учитываются вовсе, создают такую специфику звучания, которая не вызывает полного эстетического удовлетворения и заставляет настораживаться опытных музыкантов. Такие специалисты иной раз видят органические пороки там, где в действительности существуют всего лишь «детские болезни». Кроме того, некоторые тонкие вопросы формирования звуков с необходимыми признаками музыкальности еще недостаточно решены или требуют для своего решения слишком дорогих технических средств. Таким образом, потребуется еще время для более или менее полного проявления возможностей этого нового направления музыкальной техники.

Количество опубликованных работ по ЭМИ, их функциональным и электрическим схемам и принципам конструирования пока весьма незначительно. Такое положение, конечно, не стимулирует полноценное творчество в данной области и тормозит развитие техники ЭМИ.

Предлагаемая книга служит известным обобщением работ автора в области электронных музыкальных инструментов. В объеме, возможном для настоящего издания, работа не может претендовать на полноту и углубленное рассмотрение затронутых вопросов. Однако по направленности весь материал дан применительно к ЭМИ профессионального уровня без каких-либо скидок на популярность, так как автор убежден в необходимости создания основ данной техники, обеспечивающих полноценное развитие ЭМИ как перспективной технической базы музыкальной культуры. По этим же причинам автор стремился сосредоточить внимание именно на основных вопросах техники конструирования ЭМИ, не вдаваясь в вопросы, относящиеся к получению особых «эффектов».

Автор надеется, что взыскательный читатель сможет в нужных случаях самостоятельно развнть и детализировать изложенный материал применительно к своим творческим задачам. Хотелось бы особо обратить внимание на то, что никакие технические сведения сами по себе не дают возможности создать полноценный ЭМИ. Прикладная электроника в любой области требует ясного представления задач, ради решения которых она применяется. В такой синтетической области, как ЭМИ, «присоединительные характеристики» электроники к предмету творчества, помимо физических и эксплуатационных параметров, включают в себя еще эстетические требования, которые пока плохо вписываются в рамки объективных условий задачи. Поэтому от радиоспециалиста или от радиолюбителя, который захочет попробовать свои силы в создании ЭМИ, требуется хотя бы минимальная подготовка в области музыкальных знаний с тем, чтобы он был способен сознательно направить работу к успешному достиженню конечных целей.

Создание музыкального нnструмента, в том числе электронного, не самоцель, а задача, имеющая в конечном итоге музыкальный критерий.

Передавая данный обзор для публикации, автор пользуется случаем отметить большую работу своих сотрудников по электромузыкальным инструментам — Н. Андреева, А. Айзенштейна, Г. Белова, И. Варовича, М. Володиной, Б. Евдокимова, И. Карпинского, Б. Каца, К. Ковальского, В. Кудрявцева, Н. Холостову, А. Чернышева и целого ряда техников и рабочих опытного производства, участвовавших в создании электромузыкального инструмента «Экводин», а так же с благодарностью отметить связанные с этим инструментом труды советских композиторов, дирижеров, музыкантов-исполнителей и других деятелей, в разное время и разными путями содействовавших автору в его работах по электронным музыкальным инструментам.

Глава первая

МУЗЫКАЛЬНЫЙ ЗВУК И МУЗЫКАЛЬНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ

Для создания полноценных ЭМИ очень важно иметь четкое представление о структуре и свойствах звука, особенно о характеристиках музыкальных звуков.

ПОНЯТИЕ ЗВУКА И ЕГО ОБЪЕКТИВНОЕ ОТОБРАЖЕНИЕ

Понятием «звук» охватывается ряд совершенно различных явлений, составляющих цепь звеньев между вибрирующим телом (как источником звука) и высшими разделами центральной нервной системы человека (как конечным приемником и анализатором этого явления внешнего мира). Каждое звено цепи имеет свои характеристики, важные для конечного эффекта, и не представляется возможным оценить свойства и качества звука, особенно в таком тонком приложении, как музыка, по характеристикам какого-либо одного звена этой цепи.

Как было уже упомянуто, первым звеном в цепи явлений, охватываемых понятием звука, является вибрирующее тело, которым могут быть, например, струны и корпус скрипки, рельс под колесами движущегося вагона, голосовые связки человека или животного, плазма при вспышке молнии, столб воздуха в трубке или диффузор громкоговорителя. Эти различные источники звука передают свою вибрацию воздуху, в котором звук существует в форме волн переменного воздушного давления, распространяющихся от источника с постоянной скоростью и ослабевающей энергией по мере удаления от источника. В этих формах существования звук представляет собой чисто физическое явление и наглядно изображается с помощью кривой — осциллограммы, выражающей смещение какой-либо точки вибрирующего тела или смещение воздушного давления в какой-либо точке пространства в зависимости от времени.

Изображение колебательного процесса в некоторой степени объясняет физическую структуру звука и механизм его возникновения, но в очень малой степени способно показать музыкальную ценность звука. Если последнее и возможно, то только потому, что имеются опыт восприятия звуков с подобной формой колебаний и опыт применения таких звуков в музыке. Однако, забегая вперед, следует отметить, что звуки с различной формой колебаний могут производить очень сходное ощущение, и, наоборот — внешне незначительные изменения формы колебаний могут приводить к значительному изменению качества воспринимаемого звука. При-

чина этого явления заключается в том, что слух воспринимает звуки не по **форме колебаний**, а по их **спектральному содержанию** и в соответствии со свойственными слуху характеристиками ощущения тонов различных частот и интенсивностей.

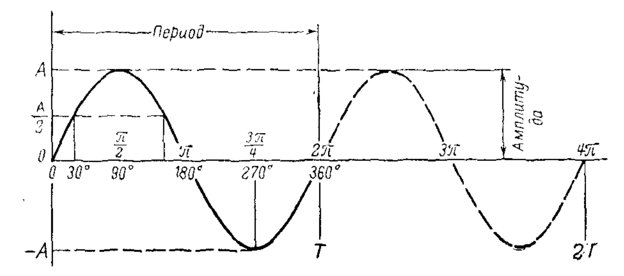


Рис. 1. Синусоидальное колебание.

Спектральная характеристика звука представляет очень важную форму отображения индивидуального качества звука по составу компонентов, или **элементарных тонов**. Как известно, всякий сложный звук, т. е. звук, обладающий индивидуально сложной формой колебаний и индивидуальным качеством для слуха (помимо признаков высоты и громкости), состоит из суммы элементарных или простых тонов различной частоты, форма колебаний которых соответствует **синусоидальной кривой** (рис. 1). Синусоидальная кривая характеризуется периодом повторения T, выражаемым в масштабе времени в миллисекундах или микросекундах, а в геометрическом масштабе — в градусах круга или в долях его периметра (2π), а также величиной максимального отклонения (по оси ординат), т. е. **амплитудой**. Количество периодов за одну секунду определяет **частоту колебаний** f, выражаемую в герцах.

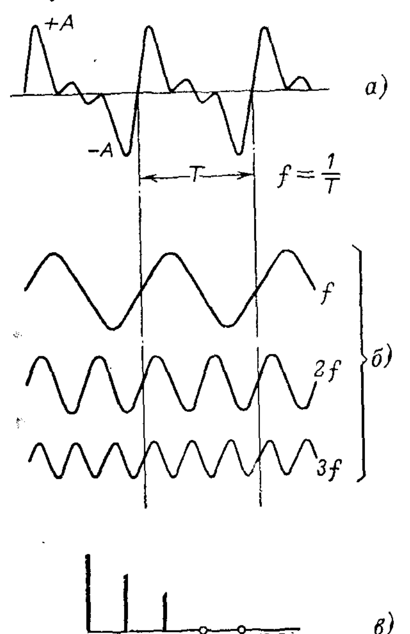


Рис. 2. Звуковое колебание устойчивой высоты сложной формы (*а*), его синусоидальные составляющие (*б*) и его спектрограмма (*в*).

Изображение сложного звука в форме суммы или шкалы простых тонов соответствующих амплитуд называется **частотным спектром**. На рис. 2 приведен пример формы колебаний (ос-

циллограммы) сложного звука устойчивой частоты (или, иначе, устойчивого периода повторения — рис. 2,*а*) и составляющие его синусоидальные компоненты (рис. 2,*б*). Приведена также соответствующая сложному колебанию спектральная характеристика—спектрограмма (рис. 2,*в*). Как известно, в таком случае частота первого простого тона тождественна частоте колебания сложного звука, а лежащие выше тоны находятся в простом кратном отношении к частоте первого тона и называются г а р м о н и к а м и.

Ценность спектральной характеристики звука состоит в том, что она одинаково приложима и к истолкованию свойств звука как физического процесса и к истолкованию звука в форме слухового ощущения. Таким образом, звуковой спектр представляет собой мост, соединяющий физические звуковые колебания со слухом. Между отображением физического содержания звука средствами осциллограммы и средствами спектрограммы есть определенная разница. Частотный спектр не отражает фазовых соотношений простых тонов, т. е. сдвигов нулевых фаз синусоид вышележащих тонов к нулевой фазе основной частоты. На рис. 3 показана осциллограмма звука, полностью соответствующего по спектральному составу звуку, осциллограмма которого была приведена на рис. 2. Поскольку слух не способен отличать фазовые соотношения отдельных компонентов сложного звука, ощущаемое слухом качество звуков, осциллограммы которых приведены на рис. 2 и 3, при одинаковой частоте будет одним и тем же, в то время как их видимые физические характеристики резко различаются. (На кривой 2,*а* гармоники совмещены по нулевой фазе синусоид. На рис. 3,*а* те же гармоники совмещены по максимумам синусоид или по нулевой фазе косинусоид.) Если же в спектр такого звука при любых фазовых соотношениях добавить две-три гармоники более высоких частот хотя бы с небольшой амплитудой, изменение результирующей формы колебания будет мало существенно, в то время как для слуха появится ощутимая разница в качестве звука.

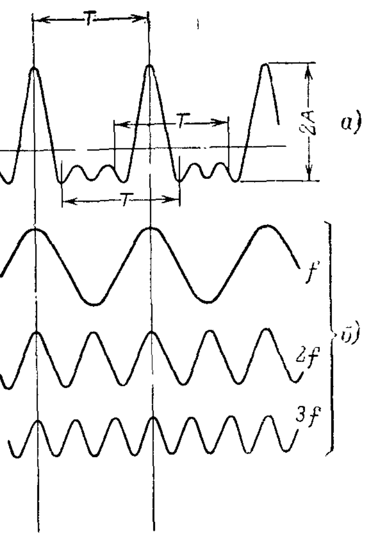


Рис. 3. Изменение формы колебаний за счет изменения фазовых соотношений гармоник.
а — сложное колебание; *б* — его синусоидальные составляющие.

КЛАССИФИКАЦИЯ ЗВУКОВ

В предыдущих примерах были рассмотрены звуки с устойчивым периодом, т. е. звуки определенной частоты. Такие звуки представляют наиболее характерную часть звуков музыкального значения и могут быть названы звуками с о п р е д е л е н н о й и н т о-

нацией[1] или высотой. Тем не менее в действительности далеко не все звуки представляются такими «правильными» колебаниями. Кроме звуков вполне определенной высоты, существуют звуки не полностью интонированные и совершенно неинтонированные, которые обычно называются шумами.

Не полностью интонированные звуки характеризуются тем, что компоненты их спектра не находятся в точном гармоническом соотношении, однако отношение компонентов к нижайшему тону имеет определенные величины, составляющие признак их тембра или «окраски» наряду с характерным распределением энергии по компонентам спектра. К таким звукам относятся всевозможные «звоны», производимые вибрирующими телами со сложной геометрической формой.

Степень отступления соотношений компонентов от гармонических может быть весьма различной. Интонационная четкость звука тем совершеннее, чем ближе соотношение компонентов спектрального ряда к гармоническим. В частности, у фортепиано нижайшие компоненты спектра практически гармоничны, в то время как более высокие имеют значительные (прогрессивно увеличивающиеся) смещения от положения, которое вытекает из номера компонента по его гармоническому ряду. В целом звуки фортепиано представляются слушателю вполне определенными по высоте. Компоненты не полностью гармонических звуков по самой своей природе не могут называться гармониками, однако, поскольку их ряд вполне определен в соотношении к нижайшему, первому тону, к ним вполне применим термин, который применяется и к гармоникам — «обертоны» (т. е. верхние тоны).

Все неполностью гармонические звуки отличает важное свойство — их ударный характер. Это свойство приводит к объединению всех компонентов при восприятии слухом по принципу амплитудно-временной связи, без которой они воспринимались бы как независимые, т. е. имело бы место ощущение не одного звука с характерным тембром, а многозвучия. Способность слуха объединять при восприятии компоненты одного и того же звукового комплекса, а не воспринимать их порознь, есть проявление важнейшей способности наших органов чувств воссоздавать образы внешнего мира по их элементам, воздействующим на периферические элементы органов чувств, и отделять один образ от другого при одновременном их восприятии.

Шумы характеризуются непрерывным спектром, в котором нельзя указать отдельные частоты компонентов. Однако шумы четко характеризуются огибающей интенсивности спектра вдоль частотной оси. Эта характерность достаточна для объединения слухом шумовых компонентов в звуковой образ источника шума.

Амплитудно-временная характеристика во всех случаях (гармонических и негармонических звуков и шумов) представляет собой весьма существенный элемент индивидуальности звукового образа. Поэтому шумы ударного типа более четко воспринимаются слухом и оставляют более четкий звуковой образ, чем шумы не-

[1] Понятие «интонация» имеет в музыке ряд различных значений. Здесь и далее этим словом обозначается свойство звука вызывать четкое ощущение высоты в силу своей определенной внутренней структуры.

прерывные. В музыкальном применении ударно-затухающие шумовые звуки служат важным арсеналом ритмического рисунка.

Непрерывность спектра шумов вовсе не означает отсутствие у него высотной определенности. Только у так называемого «белого» шума, характеризующегося непрерывным спектром постоянной интенсивности по частотной оси, не проявляются высотные и тембровые признаки. Все реальные источники шумов имеют, как было сказано, определенную частотную характеристику, благодаря которой они воспринимаются слухом в их индивидуальном высотно-тембровом качестве. Так, например, различают звучание большого барабана и оркестровых тарелок, ударяемых щеточками, или грохот обвала и шипение пара.

В отличие от гармонических звуков, для которых высота и тембр — совершенно различные качества, высота и тембр шумов есть качества или полностью совпадающие, или слабо дифференцированные. В этом отношении не полностью гармонические звуки представляют некоторую переходную категорию. Интонационно-тембровая расчлененность гармонических звуков и их интонационная четкость представляют их особую характеристику, лежащую в основе музыкальных применений и построений. В этом смысле признание за спектром единственной роли — носителя тембрового качества — оставляет открытым вопрос о сущности восприятия высоты сложных звуков, которые никогда не воспринимаются как сумма независимых тонов, но всегда в форме нерасчлененного высотного единства.

СУЩНОСТЬ ЗВУКОВОСПРИЯТИЯ

Как и любой другой орган внешних ощущений живого организма, слуховой аппарат воспринимает воздействие внешнего источника ощущений, т. е. в данном случае звуковых колебаний, по их элементам (простым тонам), а затем в высших разделах органов чувств — в коре головного мозга — воспроизводится (синтезируется или моделируется) «образ внешнего мира», в данном случае — звуковой образ. Первичными составляющими этого образа являются компоненты звукового спектра, несущие мозгу информацию о всех качествах звука. Восприятие сложной высоты звука, его тембра и эффективной громкости суть различные формы ассоциации (объединения) элементов, составляющих информацию, направленные на отражение в сознании тех или иных конструктивных признаков этой информации. При этом ассоциации элементов образуются в мозгу не пассивно, а по направлениям организованного внимания, т. е. эти процессы имеют смысловую форму.

При воздействии звуковых колебаний на слуховой аппарат прежде всего происходит возбуждение барабанной перепонки, помещающейся в конце наружного слухового канала уха, которое передается в так называемое внутреннее ухо, где осуществляется контакт звуковых (механических) колебаний с волокнами слухового нерва через сложную анализирующую систему. Эта система обеспечивает возбуждение отдельных нервных волокон звуковыми колебаниями по избирательному принципу, так что в мозг человека возбуждение нервных окончаний передается с отражением спектральной структуры звука и соответствующего положения компонентов спектра по частоте. При воздействии чистого (простого синусоидального) тона возбуждается определенная узкая группа

нервных волокон. Хотя избирательные свойства (частотная разрешающая способность) внутреннего уха очень высоки, они имеют все же определенные пределы, зависимые от участка диапазона.

В первом приближении для звуков средней высоты распределение ощущения по частотам носит логарифмический характер. Это означает, что гармонический спектр вызывает такое возбуждение нервных волокон, при котором зоны возбуждения для низких гармоник разделены относительно большими интервалами (в соответствии с интервальными коэффициентами по частотам тонов), а по мере повышения номеров гармоник интервалы невозбужденных промежуточных зон сокращаются и, если спектр имеет достаточную протяженность, возбуждение от отдельных гармоник в конце кон-

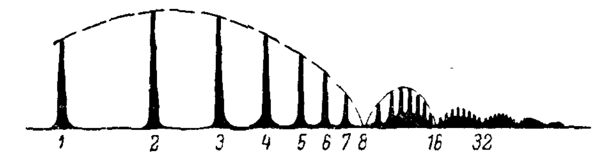


Рис. 4. Эпюра возбуждения волокон слухового нерва звуковым спектром.

цов переходит в непрерывное и становится соответствующим возбуждению от шумового спектра. Это положение схематически иллюстрируется рис. 4, где показана эпюра возбуждения волокон слухового нерва вдоль частотной оси. Из рисунка следует, что высотное ощущение звука может иметь своим источником только относительно низкие гармоники, так как высокие гармоники слухом не дифференцируются, воспринимаются по слитной огибающей возбуждения. Такое слитное ощущение, как известно из практики распознавания шумов, имеет значение тембрового восприятия. Этот признак, однако, не исчерпывает всех признаков тембрового ощущения, но определенно показывает на различие смысла избирательного ощущения тонов и ощущения распределения энергии по спектру в целом.

Исследования показали, что для ясного восприятия высоты сложного звука, как правило, совершенно не обязательно, чтобы первая гармоника имела преимущественную интенсивность. В низком регистре она вообще может полностью отсутствовать без ущерба для четкости высотного восприятия. Представление о высоте звука возникает в нашем мозгу как некоторое частотно-масштабное качество спектра, и оно тем более определенно, чем более ясно выделены в ощущении гармоники, образующие эту «высотную ассоциацию», т. е. в соответствии с рис. 4 — первые 6—12 гармоник. Вместе с тем огибающая амплитудного ряда низких гармоник, так же как и огибающая верхней части спектра, доставляет мозгу информацию о тембровом качестве звука.

МУЗЫКАЛЬНОЕ ВОСПРИЯТИЕ ВЫСОТЫ ЗВУКА

В музыкальном значении высота звука проявляется не сама по себе, а в специфическом взаимодействии гармоник двух или вообще нескольких звуков, что создает еще более твердую основу

синтеза слухом высотного качества звука из суммы его гармоник, а не путем выделения частоты первой гармоники. Это положение иллюстрируется рис. 5, где показано несколько частных случаев соединения спектров двух звуков, действующих на слух одновременно (или непосредственно следующих друг за другом, как это бывает при мелодическом движении).

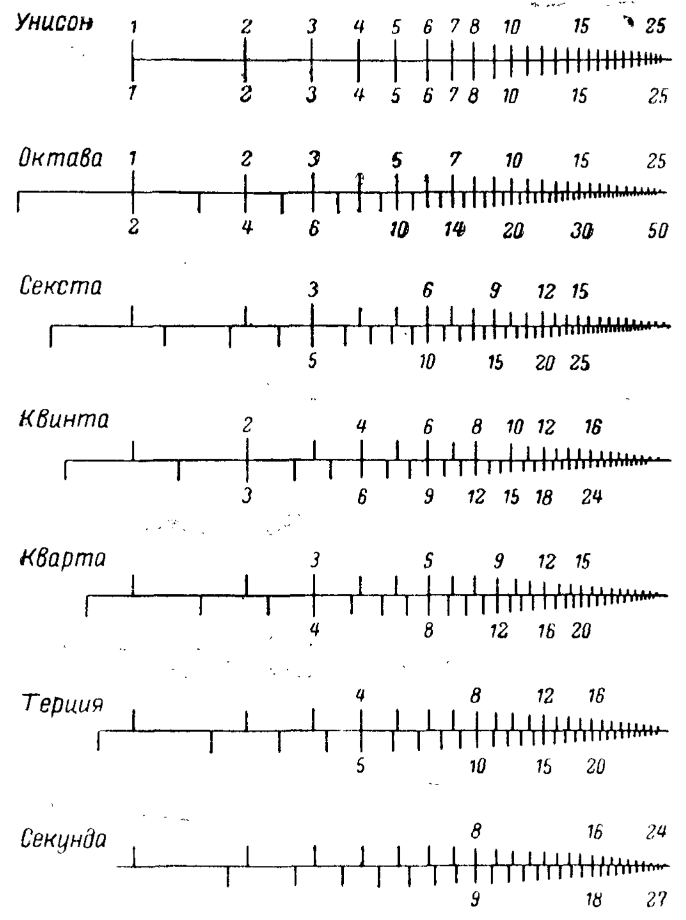


Рис. 5. Парные сочетания гармонических спектров.

На рис. 5 верхняя строка из двух спектров равных частот показывает, что звуки одинаковой частоты вызывают возбуждение слухового анализатора в точках совпадающих гармоник. Это приводит к ощущению слитности звуков, известному под названием **у н и с о н а.** **Пр сдвиге одного из спектров относительно другого** на интервал с отношением частот 2 : 1 образуется другая форма

совпадения гармоник (вторая сверху строка на рис. 5), в которой все гармоники верхнего ряда совпадают с четными гармониками нижнего ряда этой пары спектров. Интервал высоты звуков, относящийся к этому случаю, называется октавным интервалом или просто октавой. Логическое значение названий интервалов будет ясно несколько позже.

Последующие строки совмещенных спектров на рис. 5 иллюстрируют некоторые другие случаи частичного совпадения гармоник, создающие ощущение различной степени консонантности (т. е. слитности) звуков. Пары спектров здесь рамещены в порядке уменьшающихся частотных интервалов, считая от рассмотренного выше интервала октавы.

В интервале сексты совпадают 5-я гармоника нижнего спектра с 3-й гармоникой верхнего, а также кратные им пары высоких гармоник (10-я и 6-я, 15-я и 9-я и т. д.). В интервале квинты соответственно совпадают 3-я и 2-я гармоники, 6 я и 4-я, 9-я и 6-я и т. д.[1]. В интервале кварты соответственно совпадают 4-я и 3-я гармоники 8-я и 6-я, 12-я и 9-я и т. д. В интервале терции соответственно совпадают 5-я и 4-я гармоники, 10-я и 8-я, 15-я и 12-я и т. д. Интервал, называемый секундой, характеризуется столь малым числом совпадений гармоник (9-я и 8-я, 18-я и 16-я и т. д.), что он фактически мало отличается от случая, когда гармоники не совпадают вовсе, и потому справедливо относится к диссонансам, т. е. несливающимся (несозвучным) соединениям.

По мере того как число совпадающих гармоник падает, число несовпадающих гармоник соответственно увеличивается, и эти несовпадающие гармоники не только нарушают стройность частотного расположения компонентов, но и образуют перекрестное возбуждение, проявляющееся в форме биений смежных по частоте «непарных» гармоник. Таким образом, консонантность того или иного интервала двух звуков определяется, с одной стороны, числом (долей) совпадающих гармоник обоих спектров и, с другой стороны, неорганизованным (в музыкальном смысле) взаимодействием несовпадающих гармоник. Следует отметить, что неточная настройка консонантных интервалов приводит к образованию ясно слышимых биений между парными гармониками, образующими при точной настройке полное слияние, поэтому неточные консонансы, во всяком случае из числа наиболее совершенных (унисон, октава, квинта, кварта), производят очень немузыкальное впечатление своей неустойчивостью, хриплостью и рычанием.

Более сложные схемы взаимодействия спектров получаются в случае аккордов, т. е. сочетаний из трех, четырех и пяти звуков, связанных кратным соотношением частот. Характерные совпадения (и несовпадения) гармоник звуков в аккордах придают различным аккордам специфическую, как бы тембровую характерность и наделяют их различной степенью внутренней устойчивости и родства по отношению к другим аккордам.

---

[1] При объяснении сущности консонансов обычно рассматривается совпадение только первой пары гармоник того или иного интервала. При этом не только занижается значимость эффекта консонанса, но и возникает ложный повод для объяснения консонантности интервалов с более сложными коэффициентами.

МУЗЫКАЛЬНАЯ ГАММА

Совокупность звуков, находящихся в основных консонантных отношениях с каким-либо исходным звуком (который в этом случае называется тоникой), подобранных в порядке возрастающих интервалов, называется гаммой и представляет ту шкалу, по которой располагаются и перемещаются звуки в музыкальном произведении. Таким образом, музыкально-звуковое построение отражает гармоническую структуру звуков и взаимодействие гармоник различных звуков по принципу наибольшей консонантности.

Наиболее четко принцип консонантности выражен в так называемой натуральной диатонической гамме, содержащей семь ступеней в пределах октавы, повторяющихся в последующих (вниз и вверх) октавах. Структура этой гаммы становится ясной из табл. 1. Здесь же уясняются и названия интервалов: в диатонической гамме эти термины обозначают ее ступени (первая — «прима», вторая — «секунда», третья — «терция» и т. д. — от соответствующих латинских слов).

Таблица 1

Натуральная диатоническая шкала звуков

Ступень (цифровое и словесное обозначение)	Интервальный коэффициент (к I ступени)	Доля совпадающих гармоник, %[1]	Консонантность
I — прима	1:1=1,000	100	Абсолютный консонанс
II — секунда	9:8=1,125	11,8	Диссонанс
III — терция	5:4=1,250	22,4	Средний (несовершенный) консонанс
IV — кварта	4:3=1,333	29,2	Совершенный консонанс
V — квинта	3:2=1,500	41,6	Совершенный консонанс
VI — секста	5:3=1,666	26,7	Средний (несовершенный) консонанс
VII — септима	15:8=1,875	9,6	Диссонанс
VIII — октава	2:1=2,000	75	Абсолютный консонанс

[1] *За 100% принята сумма гармоник обоих спектров, образующих созвучие.*

ОКТАВНОЕ ПОДОБИЕ ИЛИ ОКТАВНОЕ СХОДСТВО ЗВУКОВ

Из интервалов рассмотренной гаммы особого внимания заслуживает интервал октавы. В этом интервале не получается полного совпадения всех гармоник двух спектров, как это имеет место в унисоне, но и не образуется «непарных» гармоник с новыми интервальными коэффициентами внутри суммарного спектрального ряда, как то получается в любом другом из рассмотренных выше сочетаний спектров двух звуков. Октавно повышенный звук просто повторяет четные гармоники исходного спектра (т. е. четную половину его компонентов), а октавно пониженный звук повторяет весь исходный спектр своими четными гармониками. Поэтому октавные звуки и физически и по звукоощущению представляются некоторым масштабным видоизменением унисона. При исполнении мелодии

в октавном отношении к оригиналу возникает ясное представление об *октавном подобии* или *октавном сходстве* звуков и всей мелодической линии, в то время как перенос той же мелодии в квинту, терцию или какой-либо другой, хотя бы и консонантный интервал, вызывает обязательное представление о параллельном (но не просто соотносящемся к первоначальному положению мелодии) сдвиге, представление о *модуляции* в музыкальном значении этого слова (т. е. об изменении *тональности*).

Принцип октавного подобия приводит к тому, что расширение любой гаммы за пределы октавы сводится к орнаментальному повторению ее структуры в последующих октавах в пределах всего диапазона слышимых звуков. В частности, это относится и к натуральной диатонической гамме (см. табл. 1).

СОВРЕМЕННАЯ 12-ЗВУКОВАЯ РАВНОМЕРНО-ТЕМПЕРИРОВАННАЯ МУЗЫКАЛЬНАЯ ШКАЛА

Диатоническая гамма при всех своих достоинствах в отношении наиболее совершенной консонантности интервалов имеет тот недостаток, что на ее различных ступенях нельзя построить равнозначные сочетания (или мелодические последовательности) звуков, используя при этом только составляющие ее звуки. Поэтому эта гамма с самого начала ее построения подвергалась различным дополнениям и видоизменениям, имевшим целью придать ей более широкие и гибкие музыкальные функции.

В результате длительных, кропотливых и, можно сказать, мучительных поисков европейская музыкальная практика и теория выработали универсальную 12-звуковую так называемую *хроматическую равномерно-темперированную шкалу*, которая позволяет получать достаточно точное приближение к натуральным интервалам в строящихся на этих звуках гаммах, а также переходить из одной тональности (т. е. гаммы с тем или иным исходным звуком-*тоникой*) в другую тональность. Такая шкала воплощена на современной стандартной клавиатуре из семи белых и пяти черных клавишей в октаве, показанной на рис. 6.

Особенность равномерно-темперированной шкалы — равенство интервальных коэффициентов смежных звуков. Интервал смежных звуков этой шкалы носит название *полутона* и имеет соотношение частот, равное $\sqrt[12]{2}$, или 1,0595. При этом в логарифмическом масштабе частоты октава оказывается разделенной на 12 полутонов. Интервальные коэффициенты несмежных звуков, приблизительно соответствующие натуральным интервалам, показаны на том же рис. 6. Сопоставление этих коэффициентов с коэффициентами, приведенными в табл. 1, позволяет судить о степени приближения темперированных интервалов к натуральным. Все интервалы натуральной гаммы здесь численно выражаются в хроматических полутонах. Так, малая секунда равна одному полутону, большая секунда — тону, малая терция имеет полтора тона, большая терция — два тона и т. д.

Важнейшее свойство темперированной шкалы заключается в том, что от каждого звука шкалы может быть взят любой темперированный интервал путем использования соответствующего ему звука этой же шкалы. На рис. 6 показаны в пределах одной ок-

тавы все одноименные интервалы, образованные на различных ступенях этой октавы.

Деление на белые и черные клавиши представляет условность, благодаря которой легко различаются входящие в хроматический звукоряд его отдельные ступени. Звукоряд по белым клавишам от звука *до* представляет, в частности, диатоническую гамму (тон-

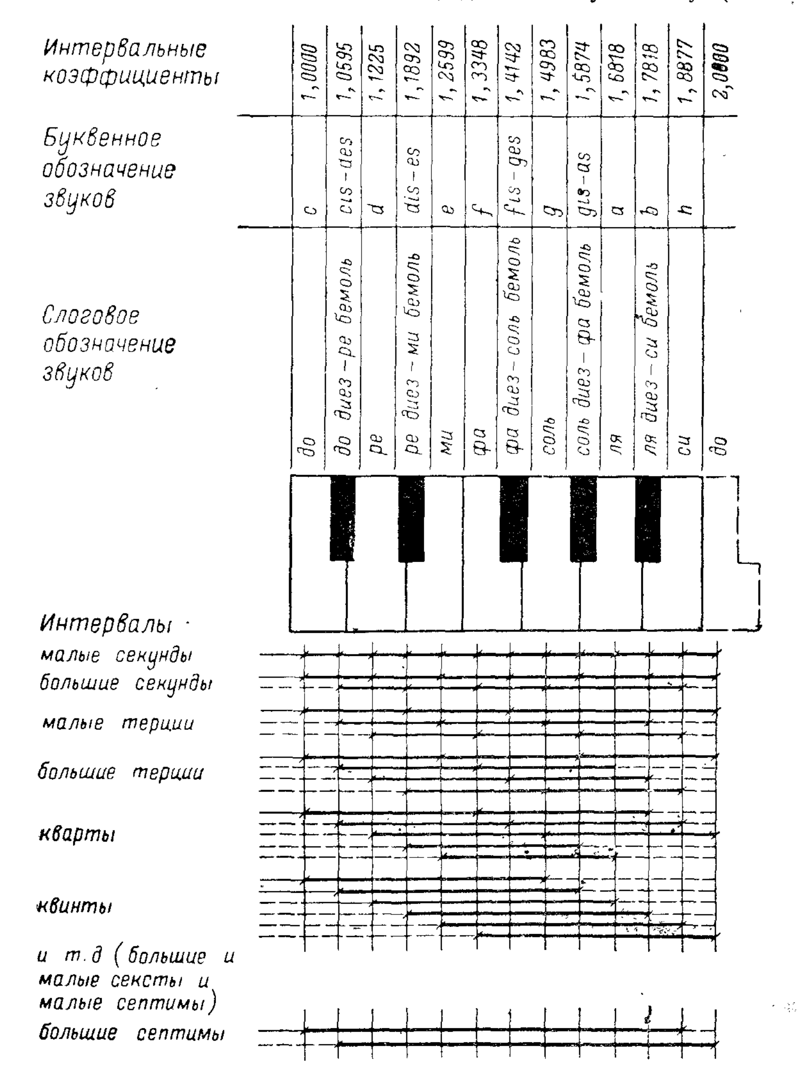


Рис. 6. Клавиатура современной равномерно-темперированной 12-и звуковой шкалы (в пределах одной октавы).

тон-полутон-тон-тон-тон-полутон), с точностью темперации, соответствующей натуральной гамме (см. табл. 1).

Равенство полутоновых интервалов хроматической равномерно-темперированной гаммы и определяет ее универсальный характер. Однако при этом все входящие в нее интервалы (кроме октавы, всегда остающейся натуральной, т. е. абсолютно точной) как уже было упомянуто, оказываются не точно соответствующими натуральным, хотя и близко к ним подходящими. Погрешности интервалов темперированной шкалы до сих пор представляют предмет

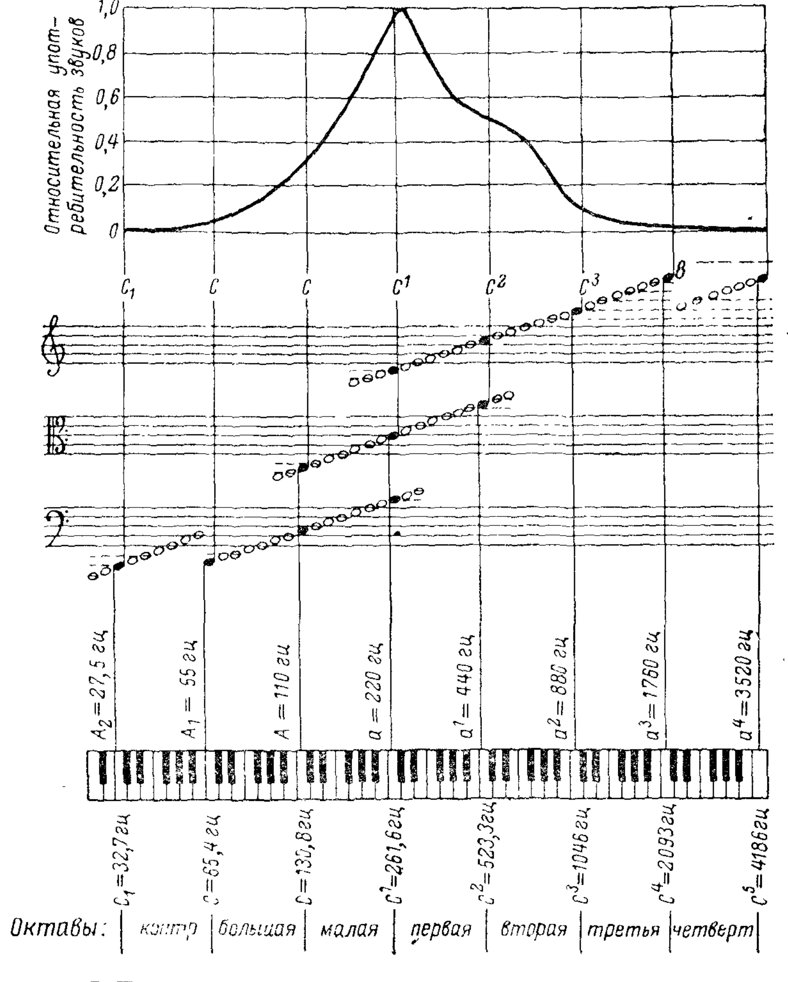


Рис. 7. Полный музыкальный диапазон. Название октав, клавиатура, нотное обозначение звуков и характеристики употребительности звуков по диапазону.

споров среди музыкальных акустиков и дают повод к поискам более «совершенной» музыкально-звуковой системы. Эти споры тем не менее оказываются практически бесплотными, так как понятие совершенства системы и художественные нормы точности строя не укладываются по существу в рамки понятий о физической точности звукоряда. С другой стороны, создание более сложных звуковысотных систем связано с усложнением технических средств исполнения музыки (конструкции клавиатур и инструментов в целом) и поэтому практически оказывается неприемлемым.

Стандартная 12-звуковая система, кроме упомянутых интервальных соотношений, характеризуется и общепринятыми абсолютными значениями частот звукоряда: международным стандартом установлена частота тона *ля* первой октавы 440 *гц*. На рис. 7 показана клавиатура фортепиано, охватывающая почти весь употребительный диапазон музыкальных звуков, и приведено нотное обозначение звуков, соответствующих всем белым клавишам. Также обозначены частоты тонов *ля* (*a*) во всех октавах и частоты тонов *до* (*c*), по которым разграничиваются октавы. Частоты всех тонов во всех октавах приведены в табл. 2. Очевидно, что как внутри октавы, так и в целом музыкальная шкала звуков является частотно-логарифмической, так как равным арифметическим приращением высоты звука соответствуют равные коэффициенты изменения частоты. В верхней части рис. 7 показана кривая, характеризующая употребительность звуков в пределах всего музыкального диапазона, полученная автором в результате статистического анализа ряда различных музыкальных произведений. Эта кривая показывает, что центральное место по употребительности звуков занимает первая октава, по мере удаления от которой вправо и влево употребительность звуков сначала постепенно, а потом значительно убывает.

Таблица 2

Полная стандартная шкала частот музыкальных тонов

Название тонов	Частоты по октавам, *гц*								
	Субконтроктава	Контроктава	Большая октава	Малая октава	1-я октава	2-я октава	3-я октава	4-я октава	5-я октава
До		32,70	65,41	130,82	261,63	523,25	1046,5	2093,0	4186,0
До диез — ре бемоль		34,65	69,30	138,59	277,18	554,36	1108,7	2217,4	4434,8
Ре		36,95	73,91	147,83	293,66	587,32	1174,6	2349,2	4698,4
Ре диез — ми бемоль		38,88	77,78	155,56	311,13	622,26	1244,5	2489,0	4978,0
Ми	20,61	41,21	82,41	164,81	329,63	659,26	1318,5	2637,0	5274,0
Фа	21,82	43,65	87,31	174,62	349,23	698,46	1396,9	2793,8	
Фа диез — соль бемоль	23,12	46,25	92,50	185,00	369,99	739,98	1480,0	2960,0	
Соль	24,50	49,00	98,00	196,00	392,00	784,00	1568,0	3136,0	
Соль диез — ля бемоль	25,95	51,90	103,80	207,60	415,30	830,60	1661,2	3332,4	
Ля	27,50	55,00	110,00	220,00	440,00	880,00	1720,0	3440,0	
Ля диез — си бемоль	29,13	58,26	116,54	233,08	466,16	932,32	1864,6	3729,2	
Си	30,87	61,74	123,48	246,96	493,88	987,75	1975,5	3951,0	

ГРАНИЦЫ МУЗЫКАЛЬНОГО ЗВУКООЩУЩЕНИЯ И БИОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЛУХА

Причины и количественные соотношения, определяющие границы диапазона музыкальных звуков и значение его регистров (отдельных участков), можно уяснить из характеристик слуха, которые, кроме того, имеют важное значение и для понимания некоторых проблем тембра.

Характеристики слуха в настоящее время преимущественно определяются по воздействию на него простых (синусоидальных) тонов. Такие характеристики можно назвать биофизическими, так как они связывают звук как физическое явление (колебательный процесс во внешней среде) с реакцией живого организма (слуха) на данное воздействие. Характеристики звукоощущения простых тонов дают возможность установить некоторые (обычно среднестатистические) закономерности звуковых ощущений, которые известным образом можно применить к восприятию слухом реальных (т. е. многокомпонентиых) и в том числе музыкальных звуков.

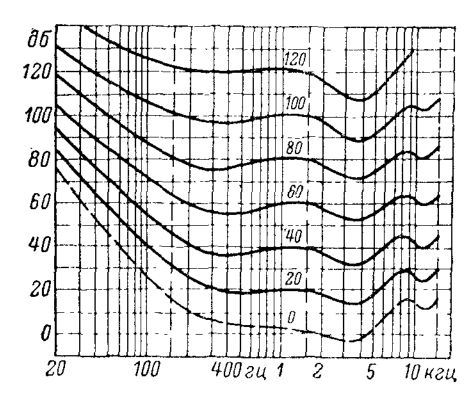


Рис. 8. Кривые равной громкости (по Робинсону и Дадсону).

На рис. 8 воспроизведены известные кривые уровней равной громкости в зависимости от частоты тонов. Нижняя кривая, соответствующая порогу минимально ощутимых тонов, и верхняя, соответствующая порог у болевых ощущений, характеризуют границы звуковых ощущений. В соответствии с общим законом, связывающим действующие физические силы с вызываемыми ими ощущениями, масштаб кривых на рис. 8 по оси абсцисс (частот) и по оси ординат (интенсивности тонов) логарифмический. Логарифмический масштаб по оси частот позволяет осуществить простую привязку кривых к музыкальной шкале, выраженной в октавах. Интенсивность тонов также удобно выражается в относительных единицах — децибелах, широко применяющихся в радиотехнических расчетах.

На рис. 9 показана другая, весьма существенная в данном случае зависимость величины разностного порога ощущения изменения высоты тона от частоты.

Наконец, на рис. 10 приведены кривые, характеризующие эффект маскировки одного тона другим, заключающийся в том, что низкий тон при соответствующей интенсивности может полностью заглушить тон более высокой частоты (при совместном их действии на слух). В то же время сам этот, даже слабый, тон низкой частоты остается хорошо слышимым на фоне интенсивного тона повышенной частоты.

Из кривых рис. 8 и 9 ясно видно, что степень детальности слуховых ощущений в возможном для слуховых ощущений диапазоне частот далеко неодинакова. Наибольшей разрешающей способностью для ощущения изменений частоты и интенсивности тонов обладает область средних частот, приблизительно от 400 до 3 000 *гц*, что и объясняет зависимость употребительности музыкальных звуков по музыкальному диапазону, показанному на рис. 7. Если взять звук *ре* первой октавы, представляющей область наибольшей употребительности звуков, то его гармоники интонационного значения окажутся в пределах наилучшего звукоощущения; частоты его гармоник с 1-й по 10-ю округленно будут иметь значения: 300, 600, 900, 1 200, 1 500, 1 800, 2 100, 2 400, 2 700, 3 0000 *гц*.

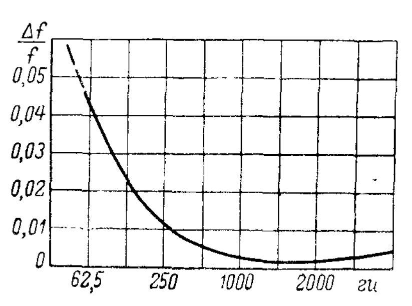


Рис. 9. Разностный порог высоты тона в функции частоты (на уровне 40 *дб*) (по Шоуэру и Биддульфу).

В среднем диапазоне существуют наиболее благоприятные условия для различных и сложных гармонических соединений звуков, т. е. для расположения аккордов. По мере повышения звуков от середины диапазона постепенно сокращается количество слышимых гармоник как за счет снижения уровня ощущения гармоник, так и за счет эффекта маскировки высоких гармо-

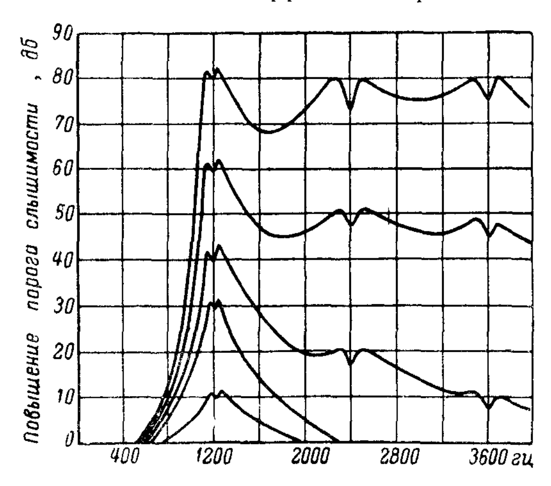


Рис. 10. Величина маскирующего эффекта различных тонов тоном 1 200 *гц* различного уровня интенсивности над порогом ощущения (по Вегелю и Лену).

ник более сильными нижележащими. Таким образом, в высоком регистре прогрессивно возрастает роль первой гармоники, которой присвоено название основного тона. Ввиду быстрого снижения уровня ощущения в области 4 000—5 000 *гц* и выше и, тем более в связи с быстрой потерей ощущения гармоник, звуки с основной частотой, относящейся к этому самому высокому регистру, быстро теряют свое музыкальное значение.

Поскольку роль высших гармоник в высоком регистре снижается, он менее, чем средний регистр, располагает к музыкально-гармоническим построениям, однако представляет наилучшие условия для мелодических голосов, которые здесь, естественно, выделяются по громкости, так как находятся в зоне наибольшей чувствительности слуха (2 000—3 000 *гц*).

В противоположность высокому регистру, в низком регистре роль первой гармоники спектра по мере понижения ее частоты становится все менее значительной, в то время как высшие гармоники, попадающие в область высокой слуховой чувствительности, создают подходящую основу для наложения на них вышележащих гармонических голосов. Таким образом, в полном соответствии с практикой музыкальной композиции басовые звуки выступают в роли гармонического фундамента.

В низком регистре восприятие сложных гармонических сочетаний (в музыкальном значении этого термина) затруднено взаимодействием близко расположенных гармоник ввиду образуемых ими биений. Однако смежные биения гармоник в спектре одного басового звука способствуют целостности и ясности его высотного восприятия.

Как показал еще Гельмгольц, биения отчетливо воспринимаются слухом до частоты в 60—80 *гц*. Для басовых звуков частотное расстояние между его гармониками оказывается равным или меньшим указанных выше величин, и, таким образом, каждая пара смежных гармоник воспроизводит в форме биений частоту основного тона[1]. Этот важный факт объясняет, почему при гармонической структуре низких звуков звуки очень низкой основной частоты, выходящие за пределы слышимости синусоидальных тонов, хорошо слышимы и пригодны для музыки, в то время как в области высоких звуков, по объясненным ранее причинам, диапазон музыкальных звуков не доходит до верхних пределов слышимости тонов почти на две октавы.

---

[1] Имея два звуковых генератора, можно поставить простой, но интересный и убедительный опыт слухового синтеза основного тона в низком регистре всего из двух гармоник: второй и третьей. Для этого генераторы точно настраивают на частоты 100 и 150 *гц* и их выходы, соединенные последовательно, подключают к телефону или громкоговорителю.

С помощью аттенюатора первого генератора сначала вводят напряжение частоты 100 *гц*. Затем плавно добавляют напряжение частоты 150 *гц*, амплитуда которого составляет около 15% от амплитуды частоты 100 *гц*. При этом вместо ожидаемого (на слух) добавления этой второй частоты (150 *гц*) ясно слышится понижение звука на октаву (т. е. иа частоту 50 *гц*), и при этом новый низкий звук по полноте тембра и ясности высотного ощущения оказывается несравненно совершеннее чистого (синусоидального) тона той же частоты.

ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ДИАПАЗОНЫ МУЗЫКАЛЬНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

Подобно тому как характеристика ощущения слухом тонов различной высоты определяет возможный диапазон в целом, частотные характеристики отдельных музыкальных инструментов, обусловленные их конкретным устройством, определяют их музыкальнопригодные диапазоны. Понятие музыкальной пригодности звуковысотного диапазона состоит в том, что в этом диапазоне звуки любого конкретного инструмента содержат в своем спектре хорошо выраженную зону интонационно важных гармоник.

Для того чтобы инструмент обладал тембровой характерностью, его частотная характеристика должна обладать особенной для данного инструмента полосой пропускания частот, относительно широкой или узкой, расположенной в полном диапазоне слышимых тонов. Для конкретной полосы частот, очевидно, существуют звуки, спектры которых будут попадать в эту полосу своей интонационно существенной частью.

Таким образом, частотно-тембровая характеристика всякого музыкального инструмента конкретно связана с его звуковысотным диапазоном. В общем случае чем выше расположена полоса пропускания инструмента, тем выше его музыкально-ценный диапазон, независимо от того, позволяет или не позволяет конструкция инструмента извлекать более низкие звуки.

Обычно частотная характеристика музыкального инструмента содержит ряд характерных частотных максимумов звукоизлучения, обусловленных наличием в системе инструмента резонаторов с определенными частотами. Такие зоны резонансного усиления тонов называются **ф о р м а н т а м и** по аналогии с характеристическими зонами резонанса полости рта, образующимися при воспроизведении речевых звуков. Форманты представляют весьма четкий и объективный признак конкретного тембра. Форманты музыкальных инструментов отличаются от формант речевых звуков более широким диапазоном своего расположения (в соответствии с более широким диапазоном музыкальных звуков относительно речевых и вокальных звуков), большей избирательностью и большим числом в составе характеристики какого-либо одного тембра [1]. Тем не менее известное сходство расположения формант речевых и инструментальных звуков представляется важным признаком сходства выразительности речевых и музыкальных звуков.

Важной особенностью музыкальных формант во многих случаях является к р а т н о с т ь их частот, создающая «формантный консонанс» и повышающая тем самым воспринимаемую м у з ы к а л ь н о с т ь т е м б р а.

В пределах той или иной частотной полосы или вблизи того или иного «частотного эпицентра» может быть образовано множество конкретных частотных характеристик с различными индивидуальными признаками. С другой стороны, та или иная частотная конструкция может быть воспроизведена в различных регистрах. Вследствие этого имеется множество музыкальных инструментов, среди которых некоторые имеют сходные диапазоны, но различные

---

[1] Если речевые звуки удовлетворительно характеризуются одной—двумя формантами, то музыкальные тембры характеризуются наличием трех, пяти и более формант.

тембры, а другие имеют сходные тембры в различных диапазонах. Таким образом, образуется весьма богатый по звуковым возможностям арсенал, в котором каждый инструмент способен выполнять какую-либо конкретную музыкально-выразительную функцию. Чем выше индивидуальность звучания инструмента, тем меньше он оказывается пригодным для выражения общих музыкальных мыслей. Это положение дает самое общее представление о целесообразности и необходимости исполнения музыки средствами такого сложного ансамбля, как симфонический оркестр.

НЕКОТОРЫЕ ДРУГИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МУЗЫКАЛЬНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

На рис. 11 приведены перечень и диапазон звучания наиболее употребительных классических музыкальных инструментов. Разнообразие типов инструментов вызвано различием и связью диапазонов и индивидуальных частотных характеристик. Но имеется еще ряд признаков и характеристик, более широко объясняющих различия между отдельными инструментами, а также объединение их в группы и подгруппы.

Для смычковых инструментов характерно выпадение гармоник, кратных величине коэффициента деления струны в точке возбуждения ее смычком. Для кларнета в высшей степени характерно выпадение четных гармоник. В орга́нах часто применяется октавное и вообще кратное усиление гармоник. В фортепиано, как уже упоминалось, наблюдается отступление от чисто гармонического звукоряда и, кроме того, выпадение гармоник, кратных коэффициенту деления струн в точке возбуждения их молоточками, подобно тому, как это происходит у смычковых инструментов.

Структурная характеристика спектра, обусловленная природой возбуждения звука (или признаки исходного спектра), для каждого индивидуального типа инструмента накладывается на его частотную характеристику, как излучателя, умножая признаки индивидуальности его тембра.

Особую и весьма обширную область характерных признаков звучания музыкальных инструментов образуют переходные (т. е. специфически неустойчивые) звуковые процессы. Переходные процессы — важный фактор, способствующий выразительности звучания и индивидуализации звукового облика инструментов.

С физической точки зрения переходные процессы могут быть классифицированы по следующим признакам:

1) процессы, формирующие амплитудную огибающую звука без воздействия на состав спектра и высоту звука;

2) процессы, связанные с изменением спектра без изменения высоты звука;

3) процессы, связанные с изменением высоты звука;

4) сложные процессы, включающие в себя признаки предыдущих групп.

Первая группа этих процессов (амплитудные) имеет ряд признаков, которые определяют их информативность:

а) в начальной фазе звука — форма и крутизна амплитудного фронта;

б) в срединной фазе — наличие затухания, его постоянная времени, порог затухания;

в) в концевой фазе — постоянная времени демпфирования (т. е. концевого затухания).

Жесткий амплитудный фронт (от 1 до 20 *мсек*) характерен для ударных, щипковых и духовых инструментов с двойной тростью. Более мягкий фронт, в пределах 20—60 *мсек,* отличает ряд духовых и смычковых инструментов. Для некоторых духовых

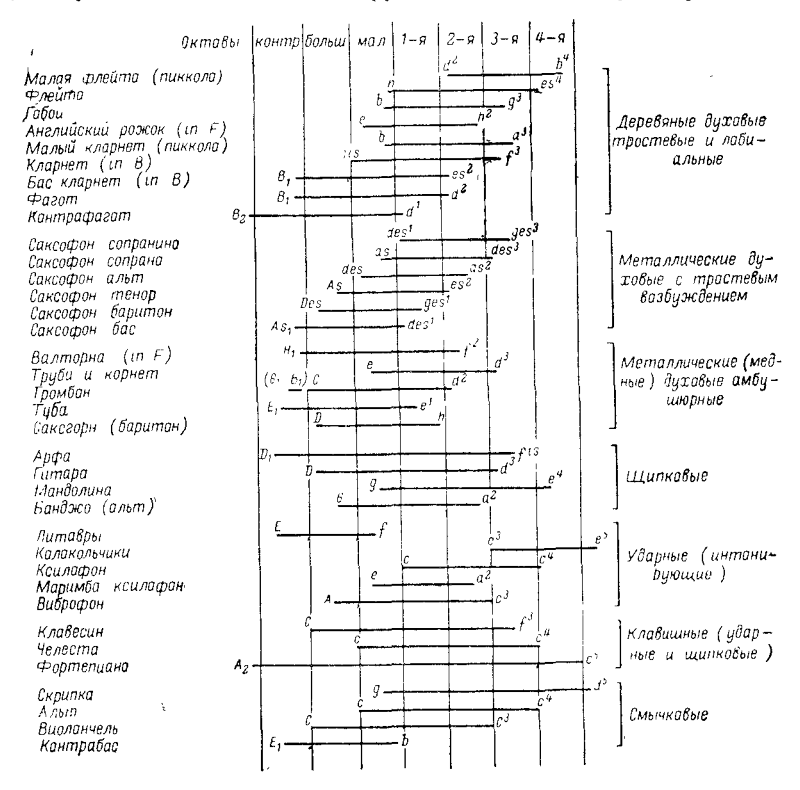


Рис. 11. Диапазоны звучания наиболее употребительных классических музыкальных инструментов.

инструментов (тромбон, валторна) характерен прием исполнения с тремолирующей атакой звука, т. е. вибрация амплитудного фронта с частотой 10—20 *гц*.

Затухание звука в его срединной части, следующей непосредственно за фронтальной фазой, весьма характерно для всех ударных и щипковых инструментов, включая такие струнные ударные инструменты, как фортепиано. Время затухания звука весьма сильно и характерно различается как для разных инструментов, так и по диапазону одного и того же инструмента. Например, у фортепиано постоянная затухания звука изменяется приблизительно от 25 *сек* в низком регистре до 1 *сек* в высоком

регистре у ксилофона время затухания звука соответственно меняется приблизительно от 1,5 до 0,3 *сек.*

В случае специального исполнительского приема («сфорцандо», т. е. акцентирования) на духовых и в некоторой степени смычковых инструментах также имеет место затухание звука в посленачальной фазе. В отличие от затухания звука на ударных и щипковых инструментах оно в этом случае неполное; звук затухает до известного предела.

Концевое затухание звука присуще почти всем инструментам и состоит в том, что при необходимости прекратить звук (независимо от того, является ли звук сам по себе амплитудно-устойчивым либо частично или полностью затухающим), это прекращение происходит не мгновенно, а в некотором промежутке времени, в течение которого звук как бы не обрывается, а мягко исчезает. Концевое затухание, как правило, имеет значение для придания звучанию некоторой общей музыкальности, а не характерности, которой наделяет его начальная фаза звука. Причина заключается в том, что момент окончания звука не имеет такого же значения для ритмического построения музыкальной ткани, какое имеет момент его возникновения и, как правило, исчезновение звуков должно происходить относительно незаметно.

Концевое затухание образуется за счет прекращения движения смычка по струне, прекращения подачи воздуха в ствол духового инструмента, а у некоторых ударных и щипковых инструментов (например, тарелки, гитара) — путем зажима звучащего тела рукой. Фортепиано не имеет демпферов почти для двух верхних октав своего диапазона, так как время основного затухания этих звуков слишком незначительно. С другой стороны, если бы в среднем и низком регистрах фортепиано не имело средств демпфирования звуков до их естественного полного затухания, исполнение музыки на нем превратилось бы в сплошной гул. Правая педаль фортепиано, позволяющая снимать и возобновлять демпфирование струн, не только создает колоссальные возможности выразительности исполнения музыки, но и придает специфический звуковой облик инструменту.

Как правило, амплитудные переходные процессы проявляются у музыкальных инструментов в сочетании с изменением спектра При затухании звука обычно протяженность его спектра значительно убывает, так как более высокие обертоны затухают быстрее расположенных ниже. В начальной фазе звука часто происходят быстрые и сложные изменения соотношений компонентов спектра и добавления шумовых компонентов к гармоникам.

Переходные процессы по высоте звука имеют различные признаки, характерно влияющие на восприятие. В зависимости от этих признаков можно выделить следующие типы переходов:

а) переход «встык», т. е. с быстрым изменением высоты звука без перерыва амплитуды (на духовых, в смычковых инструментах — без перехода с одной струны на другую);

б) переход с постепенным амплитудным замещением звуков (фортепиано, орга́н, баян);

в) переход с гармоническим перерождением звуков (передувание на духовых инструментах);

г) скользящий переход («глиссандо»).

Простейшим примером соединения амплитудного и высотного переходных процессов может служить звучание гавайской гитары.

Обычно течение переходного процесса находится в какой-то степени под контролем исполнителя, что и определяет выразительность исполнения музыки; особенно это относится к высотным переходным процессам.

Промежуточное положение между переходными процессами и статическими звуками занимает такое специфическое и важное для выразительности музыкальных звуков явление, как подтональная вибрация или вибрато[1]. Наиболее яркое ощущение вызывает высотное (или в физическом смысле — частотное) вибрато, при котором утомительное для слуха постоянное воздействие тонов заменяется их периодическим колебательным движением, захватывающим некоторую зону частотного ощущения для каждого из входящих в спектр звука тонов. Обычно вибрация имеет частоту со средним значением около 6 *гц*, при котором, выполняя свою функцию «рассеивателя» статичности звука, она не мешает звуку казаться для слуха устойчивым по высоте.

Существует большая разница — по восприятию и музыкальной выразительности — между постоянным, автоматически поддерживаемым вибрато и вибрато, находящимся в области исполнительских, намерений, как, например, это имеет место в случае смычковых инструментов. Автоматическое вибрато — это как бы принадлежность или признак самого звука и поэтому должно быть отнесено и по восприятию и по музыкальному значению к тембровым явлениям. Исполнительское же вибрато представляет вполне осмысленное и основанное на искусстве дополнение и развитие мелодического рисунка. Таким образом, автоматическое вибрато выступает в качестве средства выразительности звука как такового, а исполнительское вибрато служит средством и элементом художественной выразительности.

Обобщая изложенное, можно сделать вывод: всякий хороший музыкальный инструмент заключает в себе две различные формы выразительности звучания. Одна из них относится к звуку, взятому как бы самому по себе, и определяется системой звукообразования и звукоизлучения в данном инструменте. Эта форма выразительности действует в некоторой степени автоматически и дает повод судить о степени музыкальности изолированно взятых на инструменте звуков, об их пригодности для выражения тех или иных настроений или музыкальных эмоций. Другая, более высокая форма выразительности звучания характеризуется теми контактами, которые может осуществить взыскательный исполнитель со звуками инструмента с помощью средств, которые на данном инструменте он оказывается способным использовать, чтобы придать звучанию смысловую выразительность во всей широте музыкального значения этого слова.

Таким образом, совокупность исполнительских средств каждого инструмента представляет чрезвычайно важную характеристику, которая определяет его роль и место среди других инструментов. Соединение всех разнородных признаков звучания образует индивидуальный музыкально-звуковой образ конкретного инструмента.

---

[1] Понятие «вибрация» с физической точки зрения чрезвычайно широкое. Поэтому для определения более узкого, чисто музыкального эффекта (или приема исполнения) чаще используют термин «вибрато».

К сожалению, многие, в том числе существенные детали рассмотренных здесь вопросов, относящиеся как к самому музыкальному звуку, так и к отдельным музыкальным инструментам, невозможно охватить в столь сжатом обзоре. Некоторые отдельные проблемы структуры звука, связанные с конкретными элементами схем электронных музыкальных инструментов, будут затронуты в последующих главах.

Те конструкторы ЭМИ, которые рассчитывают создать инструменты с перспективой серьезного внедрения в музыкальную практику, должны постоянно развивать свой кругозор в музыкально-теоретических вопросах, а также изучать музыкальные произведения различных жанров как в звучании, так и путем анализа их по нотам. При этом нужно внимательно исследовать те средства, с помощью которых исполнитель на каждом конкретном инструменте с наибольшим результатом доводит до слушателя определенные намерения композитора.

Глава вторая

ЭЛЕКТРОННЫЕ МУЗЫКАЛЬНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ

КРАТКАЯ ИСТОРИЧЕСКАЯ СПРАВКА

Попытки создания электроинструментов делались еще до возникновения электронной техники. Примером такого рода может служить «музыкальный инструмент», предложенный Бурстином на основе более ранних работ Дуделя над «поющей дугой» (около 1890 г.). В этом инструменте прерывистые разряды конденсатора в цепи первичной обмотки трансформатора Тесла изменялись по частоте с помощью контактной клавиатуры. Коронирующий разряд на выводе вторичной обмотки этого трансформатора сопровождался звуковыми колебаниями воздуха на частоте, соответствующей частоте прерываний в первичной обмотке.

Значительно более зрелой по форме воплощения и по музыкальному содержанию была работа Кэхилла (1905 г.), создавшего инструмент «Телармониум». Этот инструмент состоял из ряда альтернаторов (машинных генераторов переменного тока), обладающих синусоидальной формой напряжения и генерирующих все необходимые частоты музыкального диапазона.

Действительное развитие электроинструментов началось лишь на основе электронных ламп, в связи с чем широкое определение электрические музыкальные инструменты приобрело в последующие годы более конкретное определение электронных музыкальных инструментов (ЭМИ), которые собственно и составляют предмет нашего рассмотрения.

Как наиболее ранние инструменты с электронными лампами, не имевшие, правда, практического значения, можно отметить «Пианоарфу» Бетено и инструмент самого изобретателя трехэлектродной электронной лампы Ли де Фореста (1915 г.).

Ряд инструментов был предложен в связи с развитием гетеродинного способа радиоприема. Образование мелодичных биений звуковой частоты при интерференции двух высокочастотных колебаний натолкнуло изобретателей на идею постройки ЭМИ на этом принципе. Первым инструментом такого рода, доведенным до практической реализации и имевшим в соответствующее время сенсационный успех, был инструмент советского физика Л. С. Термена «Терменвокс», патент которого (№ 780) с приоритетом от 23 июня 1921 г. знаменует начало практического становления техники ЭМИ. Инструмент Л. С. Термена символично отразил особенности новой техники в принципе управления звуком: изменение высоты и громкости в этом инструменте осуществлялось без механического контакта рук исполнителя с инструментом, а только посредством емкостного влияния рук на схему в пространстве, что производило неизгладимое впечатление и давало повод к размышлениям о новых возможностях музыкально-исполнительской техники для ЭМИ вообще.

Другой вариант ЭМИ на биениях был предложен В. А. Гуровым и В. И. Волынкиным (приоритет от 27 декабря 1922 г., патент № 1891). Здесь впервые был применен реостатный гриф для управления высотой тона и педальный регулятор громкости звука. Близкий к этому варианту инструмент «Сонар» был успешно осуществлен и применялся в концертной практике Н. С. Ананьевым (1926—1938 гг.). Примерно в то же время во Франции М. Мартено (начавший работы в области ЭМИ около 1922 г.) создает усовершенствованную модель своего инструмента с вибрирующей клавиатурой.

Новым этапом были работы В. А. Гурова в СССР (инструмент «Виолена») и Ф. Траутвейна в Германии (инструмент «Траутониум»), в которых для получения звуковых колебаний с интенсивным гармоническим спектром был применен генератор на лампе тлеющего разряда, а также были использованы эффективные средства преобразования тембра звука. К работам В. А. Гурова в известной мере примыкают работы группы других ленинградских специалистов, возглавлявшейся А. В. Римским-Корсаковым и А. А. Ивановым, по созданию инструмента «Эмиритон», работы И. Д. Симонова по инструменту «НИМИ», а также работы автора по инструменту «Экводин», начатые в 1932 г. при деятельном участии К. И. Ковальского.

Из ранних работ по электронным многоголосным ЭМИ следует отметить орга́н Жевеле и Купло (1918 г.), в котором использовалось до 700 электронных вакуумных ламп, и орга́н Фирлинга и Кока (1936 г.), построенный на газоразрядных лампах.

Одна из наиболее интересных моделей многоголосного ЭМИ лампового этапа электроники — «Новахорд» Хэммонда, в котором четко определилась схема получения одноименных октавных звуков с помощью делителей частоты, действующих от двенадцати ведущих генераторов высших тонов. Без блока выходного усилителя «Новахорд» содержит 163 вакуумных лампы. В инструменте предусмотрены средства формирования амплитудной огибающей с получением затухающих и полузатухающих звуков, средства формантного управления тембрами. Конструкция инструмента находится на уровне, отвечающем требованиям серийного производства для того периода. Наряду с «Новахордом» фирма Хэммонда продолжала усовершенствование и расширяла коммерческий выпуск электро-

орга́нов с микромашинными генераторами тонов. Эти инструменты, известные под названием «Хэммонд-орга́на», и до настоящего времени наиболее широко распространены в западных странах.

Среди отечественных работ лампового периода наиболее содержательной разработкой в области многоголосных ЭМИ следует признать электронный гармониум, созданный во Всесоюзном институте звукозаписи под руководством И. Д. Симонова. В этом инструменте была осуществлена система индивидуального управления громкостью звуков в зависимости от степени нажатия на клавиши.

Неблагоприятные весо-габаритные и энергетические характеристики сложных ламповых устройств оказали существенное сдерживающее влияние на функциональное развитие схем ЭМИ, особенно многоголосного типа. Во многих случаях конструкторы стремились не столько к совершенствованию музыкальных характеристик создаваемых ими образцов, сколько к технической рационализации и упрощению схем, которые позволили бы устранить разрыв между музыкальной и коммерческой ценностью ЭМИ. Одним из характерных приемов в этом направлении были попытки создать ограниченно многоголосные инструменты на сравнительно небольшом количестве ламп, что, естественно, приводило и к существенным ограничениям в исполнении сложных аккордов.

Транзисторная техника позволила в значительно более приемлемых конструктивных формах решить задачу построения сравнительно сложных по составу схем ЭМИ и в этом смысле оказала существенное прогрессивное воздействие на развитие их практических возможностей.

МНОГОГОЛОСНЫЕ ЭМИ

Наиболее распространенный тип ЭМИ в настоящее время — электроорган. Инструменты этой группы, несмотря на значительное количество модификаций, имеют много общего как в техническом, так и в музыкальном отношении. Это делает их взаимозаменяемыми в типичных применениях независимо от того, какие качества подразумеваются у них авторами или приписываются им рекламой. Характерный вариант функциональной схемы такого инструмента приведен на рис. 12.

Здесь двенадцать ведущих генераторов *1—1* образуют группу источников тонов, соответствующих двенадцати наиболее высоким разноименным музыкальным звукам (от *до* до *си*), расположенным октавой выше звуков диапазона клавиатуры *3*. Частоты смежных генераторов находятся в соотношении, которое соответствует полутону стандартной равномерно-темперированной музыкальной шкалы и характеризуется интервальным коэффициентом $\sqrt[12]{2}$. Каждый из этих генераторов имеет вход для частотной модуляции на подтональной частоте (около 6 *гц*), которая задается на все двенадцать генераторов от общего подтонального генератора *2* с целью получения эффекта вибрато.

К выходам ведущих генераторов подключены цепочки делителей частоты *4* с коэффициентами деления 2, образующих в каждой цепочке серию одноименных (октавных) звуков в диапазоне кла-

виатуры. Таким образом, двенадцать таких цепочек образуют полный набор частот для всех клавишей клавиатуры.[1].

Если клавиатура имеет целое число октав с одноименными клавишами на краях, в цепочке нижайшего звука предусматривается один дополнительный делитель (*4'*), обеспечивающий «октавное замыкание» диапазона клавиатуры. Для случая, представленного

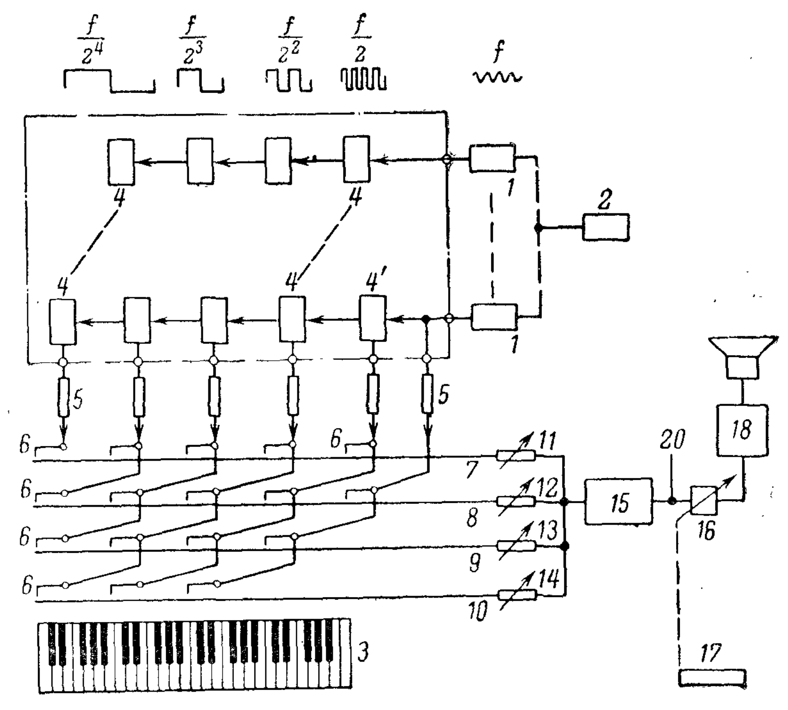


Рис. 12. Типичная функциональная схема современного ЭМИ типа органа.

на рис. 12, требуется 49 делителей частоты, из которых показаны только 9, относящихся к крайним звукам октав.

Клавиатура *3* имеет сложную контактную систему, обеспечивающую в случае нажатия на клавиши выход напряжения делите-

---

[1] Применение системы частотных делителей приводит к тому, что соотношение чистых октав сохраняется во всем диапазоне ЭМИ и не позволяет применять в них существующие методы настройки классических инструментов. При настройке широкодиапазонных классических инструментов (главным образом фортепиано) крайние регистры настраиваются с некоторым расширением по частотам (до 2% для крайних звуков). Очевидно, что система, выработанная в связи с учетом притупления различимости слухом высоты звуков в крайних регистрах, не может быть применена к ЭМИ с описываемой схемой образования октавных тонов.

лей *4—4* в последующую часть электрического тракта через разделительные резисторы *5* и индивидуальные контакты *6*, смыкающиеся при этом с групповыми (так называемыми регистровыми) шинами *7—10*. На рис. 12 показаны только контакты, относящиеся к нижней цепочке одноименных звуков. Фактически в октавном интервале имеется еще по 11 групп контактов, соответствующих другим звукам гаммы.

На шину 7 поступают сигналы с основной частотой звука данной клавиши, на шину *8* — сигналы октавно повышенной частоты, на шину *9* — сигналы с частотой, повышенной на две октавы, и на шину *10* — повышенные на три октавы. В последующую часть тракта сигналы с шин *7—10* поступают через индивидуальные регуляторы уровня *11—14*, позволяющие изменять состав результирующего спектра, т. е. тембр звучания инструмента.

Бинарные делители *4* в соответствии со свойственным им принципом действия выдают сигнал в форме симметрично-прямоугольных колебаний, имеющих нечетный гармонический состав. Если в тракт введен только регистр шины *7*, получается звучание в характерном тембре нечетного спектра, в первом приближении соответствующем тембру кларнета. По мере ввода сигналов с шин *8*, *9* и *10* сначала происходит восполнение четных гармоник, а затем, при повышении уровня этих сигналов, появляются октавные призвуки, которые, однако, не всегда переходят в разряд самостоятельных октавных звуков (октавных удвоений) из-за полной синхронизации этих призвуков с основным звуком при его высотном движении.

Следует заметить, что, хотя формально количество вариантов дозировки описанных компонентов может быть чрезвычайно большим, число вариантов для тембра с позиций конкретных музыкальных применений оказывается фактически весьма ограниченным. Кроме того, как видно из схемы рис. 12, для более высоких звуков диапазона октавные дополнения оказываются ограниченными по числу даже в случае использования сигналов непосредственно от ведущих генераторов *1*, а не только от делителей *4*.

Соединенные сигналы регистров поступают в частотный фильтр *15*, имеющий обычно клавишный переключатель для нескольких фиксированных вариантов характеристик, обеспечивающих с известным (обычно весьма приблизительным) сходством имитацию тембров тех или иных классических инструментов. Управление громкостью звука в процессе музыкального исполнения обеспечивается регулятором *16* с приводом от педали *17*. Далее сигнал подается в усилитель *18* и воспроизводится акустической системой.

Описанная схема не соответствует в точности какому-либо конкретному инструменту, но представляет, как было отмечено выше, известное типичное обобщение. Так, с определенными оговорками ее можно распространить на модель американского электроорга́на «Хэммонд», японского — «Илектон», английского — «Вокс», органа ГДР «Ионика», советского — «Юность». В этих и других случаях конкретные признаки и состав схемы претерпевают более или менее существенные изменения. Наиболее существенно отличается орга́н «Хэммонд», где вместо электронных ведущих генераторов и делителей частоты используется упоминавшаяся выше система машинных микрогенераторов тона с приводом от электродвигателя, синхронизированного камертоном. В орга́нах «Ионика» и «Юность» используется более совершенная система клавиатурной коммутации: в «Ионике» применяется плавный контроль уровня сигналов в за-

висимости от глубины прожима клавишей с использованием для этого газоразрядных диодов, управляемых полем высокой частоты, в орга́не «Юность» используется групповая электронная коммутация с применением всего одной пары контактов под каждой клавишей.

Значительное усложнение без изменения по существу претерпевает схема в случаях, когда орга́н в соответствии с классической практикой снабжается двумя или тремя клавиатурами. В этих случаях каждая клавиатура имеет собственную коммутационную систему (*6—10*), систему смешивания регистровых сигналов (*11—14*), а также систему частотных фильтров (*15*) и индивидуальный ограничитель уровня в канале каждой клавиатуры, что позволяет устанавливать необходимый тембр и относительный уровень громкости для каждой из клавиатур. Обычно в этих случаях, чтобы расширить общий диапазон инструментов, их относительно короткие клавиатуры имеют октавно смещенные поддиапазоны. Соединение сигналов клавиатур происходит в точке *20*.

Другая форма усложнения инструментов по данной схеме заключается в развитии контактной системы клавиатур: вводятся регистры, соответствующие не только октавным, но также 3-й и 5-й гармоникам, которые заимствуются из темперированного ряда хроматической гаммы с известной погрешностью по отношению к частоте натуральных гармоник. Эта погрешность вносит в звучание таких органов специфический характер, приемлемый с позиций некоей новизны тембра, но весьма дискуссионный для применения в классической музыке.

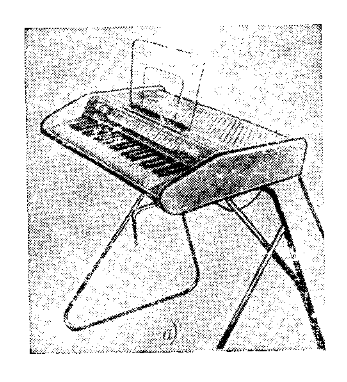
В «Корд-органе» Хэммонда, одной из последних разновидностей инструментов этой фирмы, применена обычная диатоническая клавиатура для правой руки (используемая в основном для исполнения мелодии) и кнопочная клавиатура для левой руки, контактная система которой соединяет различные тоны в наиболее употребительные аккорды. Техника игры на этом инструменте поэтому весьма сходна с техникой игры на аккордеоне. Хэммонду, кстати сказать, принадлежит изобретение пружинного ревербератора, который применяется теперь не только в орга́нах этой фирмы, но и в ряде ЭМИ других фирм, а также в радиовещательных приемниках.

Значительно больше примеров различных дополнений и изменение функциональной схемы, приведенной на рис. 12, можно было бы привести в случае анализа уникальных и опытных образцов электронных орга́нов и связанных с их разработкой научных исследований по отдельным проблемам, а также в случае обзора патентов и авторских свидетельств на изобретения в этой области. Однако такое рассмотрение выходит за рамки данного обзора.

В качестве примера внешнего вида промышленных моделей электроорганов на рис. 13 приведены малогабаритные одноклавиатурные орга́ны «Ионика» (ГДР) и «SX-50» фирмы Нейшнл Илектик «Матцушита», Япония (рис. 13,*а* и *б* соответственно). На рис. 14 показан орга́н «Илектон» В-5 японской фирмы Иомаха с двумя ручными и одной ножной клавиатурой, соответствующей традиционным системам классического орга́на.

Прежде чем дать краткую обобщенную оценку музыкального и технического уровня современных электроорга́нов, необходимо отметить, что ЭМИ подобного типа отнюдь не полностью удовлетворяют необходимым музыкально-техническим требованиям к многоголосным инструментам, выдвигаемым музыкальным искусством.

Почвой всеобщего «орга́нного» направления разработки и производства многоголосных ЭМИ служит не музыкальная практика, а техника и направленность музыкального сознания инженеров. Функциональная схема ЭМИ типа орга́на для специалиста-техника представляется вполне совершенной по чисто формальным признакам, и часто заслоняет многие важные детали подлинно музыкального звучания и исполнительского искусства. Относительный успех ЭМИ типа орга́на можно объяснить тем, что некоторые формы его звучания (так называемые «космические» или «электронные» звуки) оказались действительно необычными и потому привлекательными.



Особенно ощутимым является отсутствие возможности полноценного исполнения фортепианной литературы, занимающей огромное место как в классическом наследии, так и в современном музыкальном искусстве. Не говоря уже о том, что в понятие фортепианного стиля входят многие тонкие признаки звучания, не свойственные электронным орга́нам, последние не обладают по крайней мере двумя характеристиками фортепиано, обусловливающими его исключительное положение в ряду других многоголосных инструментов: возможностью индивидуальной ударной дозировки громкости звуков и удержанием (накоплением) звуков с помощью педали.

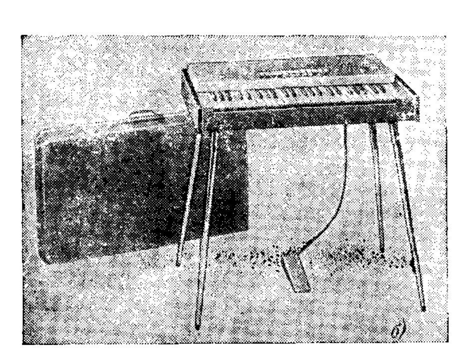


Рис. 13. Портативные органы.
а — «Ионика» (ГДР); б — SX-50 Нейшнл Илектрик (Матцушита, Япония).

Действительные возможности применения электронных орга́нов для исполнения классической музыки, независимо от тех возможностей, которые приписывают им их создатели, пока весьма ограничены. И не случайно, что при всей своей привлекательности для любителей электронные орга́ны еще почти не проникли в «большое» музыкальное искусство. Значительно больше возможностей применения электронных орга́нов в эстрадном жанре, испытывающем постоянную потребность к проявлению оригинальности и смене форм звучания, а также в музыкальном оформлении кинофильмов, театральных постановок, радиокомпозиций и в других формах иллюстративной музыки.

Технический уровень электронных орга́нов находится в определенной зависимости от ограничений, накладываемых на развитие

их функциональных и электрических схем требованиями надежности и особенно условиями коммерческого успеха.

Чтобы приблизительно оценить разрыв между необходимым для сколько-нибудь широкого (в жанровом отношении) применения и возможным в настоящее время уровнем функциональной и технической сложности схем многоголосных ЭМИ, можно дать следующие количественные характеристики: типичный современный орга́н содержит два, редко три или четыре транзистора в составе схемы

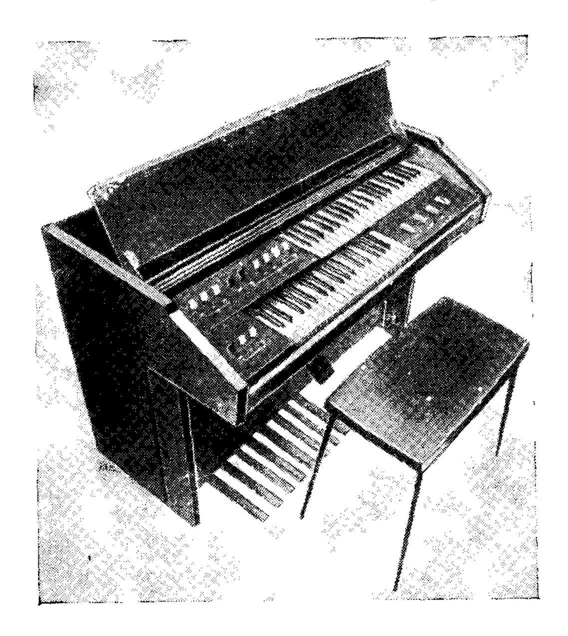


Рис. 14. Электронный орган «Илектон» В-5 фирмы Иомаха (Япония).

каждого тона (клавиши); полноценное же обеспечение музыкально-звуковых функций с позиций действительно выразительного звучания и исполнения, как это будет понятно из дальнейшего, требует по крайней мере 15—20 транзисторов для того же участка схемы. При диапазоне инструмента, соответствующем классическому фортепиано, т. е. при 85 полутонах, полная схема инструмента должна содержать по крайней мере 1 500 транзисторов.

Как и для других сложных электронных устройств, для ЭМИ перспективна конструкция с применением интегральных схем. Интегральные блоки способны не только существенно повысить в самом ближайшем будущем технико-экономические показатели ЭМИ типа орга́нов, но создают качественно новую перспективу для разработки портативных ЭМИ с автономным питанием типа электроаккордеона.

МЕЛОДИЧЕСКИЕ ЭМИ (ОДНОГОЛОСНЫЕ И ДВУХГОЛОСНЫЕ)

Значительно ближе к применению в ансамблях различных жанров подходят мелодические (главным образом, одноголосные) ЭМИ, в которых уже в настоящее время на реально существующей технической базе можно достигнуть относительно высокого уровня качества и выразительности звучания при допустимой конструктивной сложности, надежности и приемлемой стоимости. К сожалению, некоторая часть специалистов, и особенно радиолюбителей, понимает одноголосный инструмент не как специфический ансамблевый

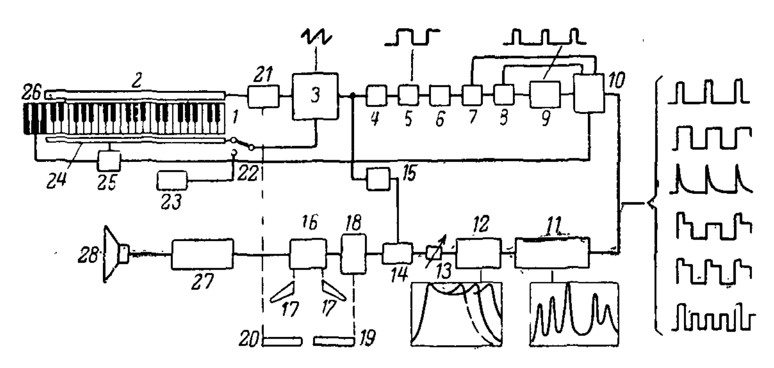


Рис. 15. Функциональная схема одноголосного ЭМИ «Экводин» (модель В-11).

тип, имеющий вполне определенные музыкальные функции, а как некий примитив или несовершенную выкопировку из схемы многоголосного инструмента.

Средства мелодической выразительности, свойственные одноголосным инструментам, как правило, находятся в некотором противоречии с конструкцией, характерной для многоголосных инструментов. Поэтому многоголосные инструменты при всех своих привлекательных возможностях оказываются неспособными заменить одноголосные инструменты, когда требуется с подлинной выразительностью исполнить мелодию. По сравнению с классическими одноголосными инструментами одноголосные ЭМИ обладают важным преимуществом — широкой многотембровостью, которая устраняет чрезмерно узкую специализацию исполнителей и ограниченность применения самих инструментов.

В общем следует признать, что как одноголосные, так и многоголосные инструменты имеют каждый свою сферу применения, и бессмысленно противопоставлять их друг другу.

На рис. 15 приведена в качестве примера современного мелодического инструмента функциональная схема инструмента «Экводин» (модель В-11), которую, по-видимому, пока можно считать наиболее отработанной для получения необходимых характеристик выразительного звучания мелодии и приближения этого звучания к требованиям и идеалам, сложившимся в практике различных ансамблей.

Здесь клавиатура *1* через многоконтактный реостат *2* задает управляющее напряжение на ведущий блокинг-генератор *3*, имеющий совместно с клавиатурой диапазон в 3,33 октавы (приблизительно от 1 до 10 *кгц* по частоте повторения импульсов). Этот ограниченный диапазон расширяется до 7,33 октавы с помощью серии октавных делителей *4—7*, включаемых по мере необходимости в процессе исполнения с помощью диапазонного клавишного переключателя. Последний делитель упомянутой серии (*8*) всегда включен и служит не для переноса диапазонов, а для подачи сигнала соответствующей огибающей — совместно с делителем *7* и одновибратором *9* — в схему спектрального преобразователя *10*, который обеспечивает семь вариантов состава спектра (семь вариантов волновых форм) сигнала для последующего формирования тембра в частотных фильтрах *11* и *12*. Частотный фильтр *11* обеспечивает двенадцать вариантов частотных характеристик с определенными формантными признаками, соответствующими признакам ряда важнейших оркестровых инструментов. Важным дополнением к фильтру *11*, а в некоторых случаях его заменой служит полосовой фильтр *12*, обеспечивающий семь вариантов характеристик для границ полосы воспроизведения.

Через ограничитель уровня (модератор) *13* сигнал проходит в дополнительный полосовой фильтр *14*. Автоматическое управление шириной полосы в зависимости от высоты звука обеспечивается подачей в фильтр управляющего напряжения от частотного детектора *15*, связанного с выходом ведущего генератора *3* *. В дополнение к этой автоматической регулировке тембра по диапазону предусмотрена коррекция спектра колебаний одновибратора *9* в зависимости от частоты импульсов на его входе. Изменение тембра не ограничивается упомянутыми переключениями в блоках *10*, *11*, *12* и автоматическими регулировками в блоках *9* и *14*. Для нюансировки тембра для достижения надлежащей выразительности звучания в канале звуковой частоты содержится еще один полосовой фильтр *16*, характеристики которого плавно варьируются с помощью коленных рычагов *17—17* в процессе исполнения музыки. Между фильтрами *14* и *16* включен оперативный регулятор уровня громкости *18*, приводимый в действие правой педалью инструмента *19*. Тракт заканчивается выходным усилителем *27*, нагруженным на акустическую систему *28*.

Левая педаль *20* служит для ввода в действие блока плавного перехода по высоте звука *21*, включенного между реостатом *2* и ведущим генератором *3***.

Ведущий генератор *3* имеет два входа: основной, на который подается упомянутое выше напряжение с реостата *2*, обеспечивающее изменение его частоты в диапазоне клавиатуры, и дополнительный — для подтональной частотной модуляции, имеющий переключатель *22*. С помощью этого переключателя исполнитель имеет возможность выбрать характер вибрации звука и применить либо автоматическую вибрацию, источником которой служит генератор подтональной частоты *23*, либо пальцевую вибрацию, которая образуется с помощью подклавишного электромеханического преобразователя *24* при вибрирующем движении пальцев на клавишах кла-

---

* Авторское свидетельство № 181.976.

** Авторское свидетельство № 129.477.

виатуры *1* *. Если автоматическая вибрация создает специфический эффект «электронных» тембров, то пальцевая вибрация в сочетании с действием блока плавного перехода по высоте звука доводит выразительность исполнения на «Экводине» до уровня, достигаемого на смычковых инструментах.

Помимо вибропреобразователя под клавиатурой *1* содержится пусковое устройство *25* для схемы формирования амплитудной огибающей звука, совмещенной со схемой спектрального преобразователя *10*, режимы которой устанавливаются с помощью клавишного манипулятора *26*. Последний позволяет создать режим тянущихся или затухающих звуков с различной крутизной амплитудного фронта и различной длительностью концевой фазы. Для обеспечения свободного затухания звука после снятия пальцев с клавиатуры ведущий генератор *3* содержит устройство запоминания частоты, соответствующей высоте звука, на которой осуществляется затухание **.

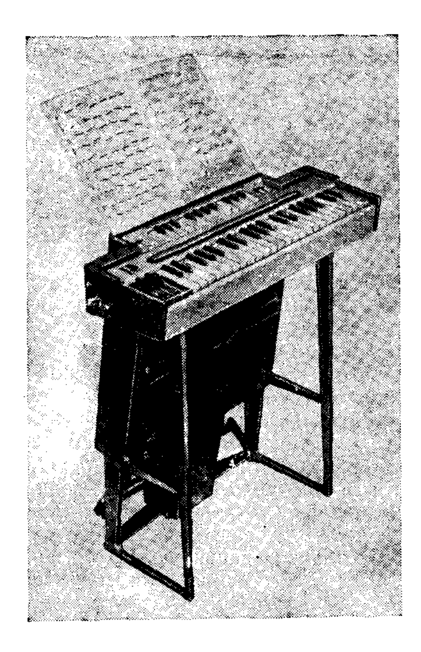


Рис. 16. Внешний вид инструмента «Экводин» (В-11).

Сравнивая схему рис. 15 с частью схемы рис. 12, относящейся к одноголосному тракту, легко убедиться, что в схеме рис. 15 средства формирования звукового сигнала и средства музыкального управления звуком представлены значительно более полно. К этому следует добавить, что реальные характеристики ряда блоков соответствующего функционального содержания в схеме рис. 15 (такие, например, как частотные фильтры) отличаются значительно более тонкой внутренней детализацией, обеспечивающей достижение соответствующего музыкального эффекта ***. Таким образом, выявляются преимущественные возможности схемы одноголосного инструмента для детального и разностороннего формирования выразительного музыкального звучания.

Внешний вид инструмента «Экводин» (модель В-11) без блока громкоговорителей приведен на рис. 16. На рис. 17 показан момент исполнения музыки ансамблем из четырех инструментов «Экводин» и рояля.

Опыт музыкального применения некоторых советских мелодических ЭМИ («Экводин», «Эмиритон», «Неовиолена») показывает,

* Авторское свидетельство № 126.354.
** Авторское свидетельство № 72.652.
*** Авторское свидетельство № 141.058.

что при надлежащем исполнительском освоении такие инструменты способны уже теперь встать в один ряд с классическими оркестровыми инструментами и в определенных случаях выполнять функции солирующих концертных инструментов.

Мелодические инструменты двухголосного типа, осуществленные в настоящее время лишь на уровне опытных образцов (например, «Сонар», «Экводин»), представляют собой совмещение двух пол-

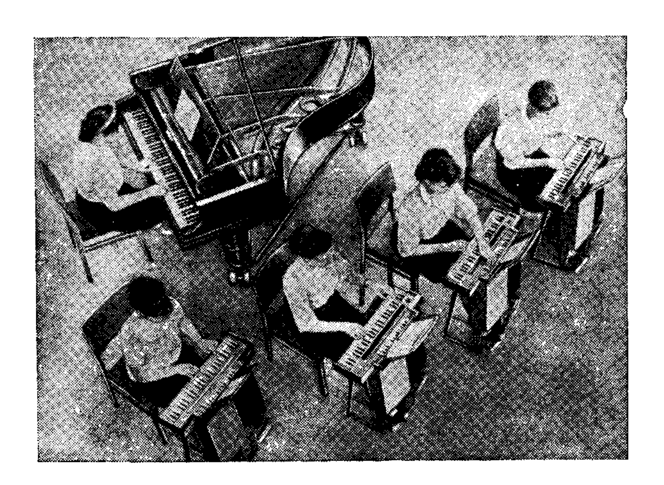


Рис. 17. Ансамбль из четырех инструментов «Экводин» и рояля.

ностью или частично независимых каналов одноголосного типа в общей конструкции. Такие инструменты помимо возможности полноценного исполнения репертуара смычковых инструментов (с двойными нотами), представляют значительный интерес для оркестровых ансамблей, поскольку они олицетворяют компромисс между сложностью оркестрового состава из одноголосных инструментов и недостаточной выразительностью многоголосных ЭМИ. Несомненно, что со временем двухголосные ЭМИ получат распространение, соответствующее их специфическим, довольно широким возможностям.

ШУМОВЫЕ ЭМИ

Необходимо также сказать несколько слов о шумовых ЭМИ, занимающих в музыке небольшое, но необходимое место, особенно в связи с ее ритмическим построением. В этой группе затруднительно привести какую-либо характерную общую схему, но можно, однако, указать на отдельные удачные работы.

Во Всесоюзном институте звукозаписи И. Д. Симоновым был разработан весьма своеобразный инструмент «Шумофон», в котором напряжение источника белого шума подвергается обработке в си-

стеме узкополосного фильтра с перестраивающимся максимумом в диапазоне звуковых частот и воспроизводится репродуктором. В результате действия этого фильтра шум приобретает известное высотное качество, выраженное тем более определенно, чем выше настройка фильтра. При плавной перестройке фильтра образуется звучание, напоминающее мелодию ветра, которую, однако, при соответствующем управлении легко привести к «музыкальным нормам». Управление осуществляется путем перемещения рычага, связанного с настройкой частоты фильтрации.

Автором был разработан шумовой инструмент, в котором источником шумовых импульсов служит счетчик Гейгера, подвергаю-

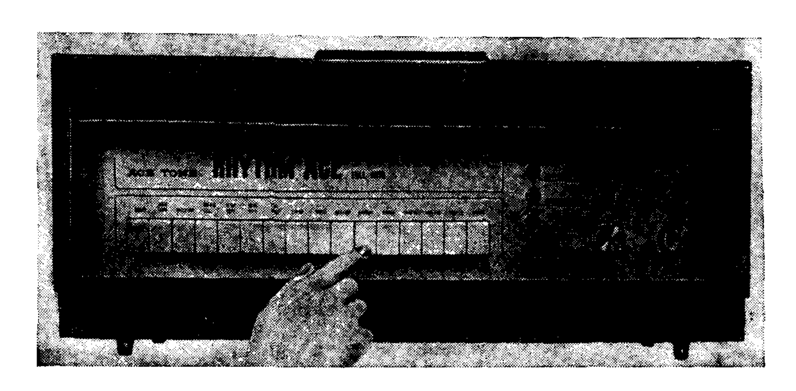


Рис. 18. Шумовой ЭМИ-автомат «Ритм-Эйс» (FR-1).

щийся облучению радиоактивным препаратом[1]. Изменяя интенсивность облучения, можно в широких пределах варьировать среднюю частоту импульсов, в то время как с помощью резонансных контуров достигается тембровый эффект, аналогичный эффекту формант. При использовании пересчетной схемы не только понижается частота импульсов счетчика на ее выходе, но и усредняется их вероятный период повторения. В этом случае может быть осуществлен постепенный переход от статистического распределения импульсов к почти регулярному во времени, т. е. переход от безусловного шума к звукам с относительно четкой высотой. Все эти градации могут быть воспроизведены в форме либо тянущихся, либо затухающих звуков с различной крутизной амплитудного фронта и различной скоростью самого затухания.

Японская фирма Эйс Тон выпускает ударно-шумовой инструмент-автомат «Ритм-Эйс» (модель FR-1), предназначенный для имитации ударной группы танцевального ансамбля. Этот инструмент (рис. 18) содержит шумовой генератор с двумя различными частотными фильтрами и два тональных генератора (с частотами 130 и 2 300 *гц*) с пусковыми устройствами для образования затухающих звуков. Так как время затухания установлено относительно малым, тональные сигналы воспринимаются не как интонированные

---

[1] Авторское свидетельство № 131.213.

звуки, а как стуки с тембром барабана и кастаньет. Затухающие сигналы на шумовой основе воспринимаются как звучание оркестровых тарелок с возбуждением щеточками и как позвякивание бубна. Эти четыре сигнала вводятся в усилитель с помощью пересчетных схем с различными коэффициентами (*1, 2, 3* и *4*), запускаемых от щелчкового генератора-метронома. При этом могут быть установлены сложные комбинации ритмов с помощью 18-клавишного переключателя («вальс», «рок-н-ролл», «слоу-фокс», «танго», «марш» и т. п.). Темп ритмического периода меняется с помощью регулятора плавного действия в пределах от 20 до 80 ударов в минуту. Инструмент имеет маломощный выход, рассчитанный для подачи сигнала на отдельный усилитель и акустическую систему.

ЗАДАЧИ И НАПРАВЛЕНИЯ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЭМИ

Несмотря на то что ЭМИ различных групп обладают довольно четкими различиями в структуре функциональных схем, имеется все же и много общих признаков и требований. Эти требования порождают некоторые общие задачи на пути создания инструментов, которые отвечали бы высокому уровню музыкального применения и могли получить широкое распространение. Это во всяком случае верно в отношении главных, т. е. первых двух из трех групп ЭМИ, описанных выше. Основные задачи, не считая техники в чистом виде, можно отнести к двум направлениям работ в этой области, а именно — к проблеме *синтеза звука* и к проблеме *исполнительского контакта со звуком*.

Один все еще не решенный вопрос, входящий в проблему синтеза звука, — получение спектральных структур с распределением энергии по гармоникам, оптимально отвечающим требованиям высокой интонационной способности звука. Для проявления этих качеств, как это было показано в гл. 1, требуется определенным образом сконцентрировать энергию спектра в зоне нескольких нижайших гармоник, образующих внутреннюю его аккордику. Другую сторону разработки спектров представляет получение особых спектральных структур, создающих характерные тембровые признаки звука (например, выпадение или преобладание кратных гармоник).

Особая проблема, пока весьма слабо разработанная, — получение спектров с не полностью гармоническими обертонами, представляющих значительный музыкальный интерес как в связи с их особыми тембровыми качествами, так и в связи с повышенной различимостью звуков с такими тембрами в аккордах.

Из других важных для формирования тембра задач прежде всего надо назвать поиск частотных характеристик, отвечающих оптимальным музыкально-тембровым структурам.

Среди других вопросов формирования звучаний, требующих дальнейшей разработки, следует упомянуть использование реверберационных устройств, устройств унисонного звучания для сольного инструмента, пространственное распределение звукоизлучателей и некоторые другие, которые можно отнести к категории особых эффектов.

Значительно более общая и все еще недостаточно разработанная проблема электронного звукообразования — синтез переходных звуковых процессов, составляющих важный признак индивидуализации звукового образа и богатый арсенал выразительных средств

любого полноценного музыкального инструмента. До последнего времени здесь дело практически все еще не шло дальше формирования некоторых характерных, но не слишком сложных элементов амплитудной огибающей звука. Только в отдельных, преимущественно в лабораторных, случаях синтезированы некоторые переходные характеристики, в которых обнаруживается временно́е изменение структуры звука или совмещение его с шумовыми компонентами.

Трудность применения в ЭМИ средств получения сложных переходных звуковых процессов состоит не только в том, что недостаточно разработана структура этих процессов, но также и в том, что их художественное использование представляет преимущественно предмет исполнительского искусства, а не автоматического действия. Поэтому кроме синтезирования тех или иных переходных процессов должны разрабатываться и исполнительские средства воздействия на них.

Важнейшей проблемой для конструкторов ЭМИ представляется проблема исполнительского контакта со звуком, которая часто заслоняется проблемами обеспечения функций электронных узлов и блоков. В действительности электронный музыкальный инструмент тем и отличается от обычного радиоаппарата, что он предполагает весьма активное, гибкое и творческое воздействие на его функции и режимы со стороны музыканта-исполнителя. Осознание конкретной связи исполнителя со звуком во всех его сложных и тонких формах чрезвычайно важно для создания полноценного ЭМИ.

Иногда говорят, что «звук в ЭМИ получается от легкого прикосновения пальцем к клавише». Если это действительно так (и только так), то не остается средств для исполнительского воздействия на многочисленные оттенки звука, составляющие существенный признак выразительного музыкального исполнения. Музыкант должен иметь определенные и четкие ощущения в пальцах (и под ногами, когда речь идет о педалях) для того, чтобы соразмерить свои усилия с намерениями в отношении извлекаемых звуков. Поэтому при отработке средств исполнительского воздействия на звук далеко не последнее место занимает вопрос о таких геометрических и механических характеристиках клавиатуры, педалей и других игровых элементов инструмента, которые могут обеспечить музыканту четкую (логическую и осязательную) связь его движений и усилий с изменением звука. Одну из важнейших проблем такого рода представляет, например, создание подклавишных приемников силы ударно-пальцевого управления громкостью звука.

В последующих главах будут относительно подробно рассмотрены важнейшие элементы электрических схем ЭМИ, связанные с описанными выше функциональными схемами, с учетом получения на их основе таких характеристик ЭМИ, которые соответствуют современным музыкальным требованиям.

Глава третья

ГЕНЕРАТОРЫ КОЛЕБАНИЙ ЭМИ

Генераторы колебаний, используемые в ЭМИ, в основном могут быть разбиты на следующие группы:

одночастотные тональные генераторы многоголосных ЭМИ;

подтональные генераторы для вибромодуляции звука;

диапазонные тональные генераторы мелодических ЭМИ;

шумовые генераторы для специальных (в основном, ударных) ЭМИ и для схем синтеза сложных переходных процессов звука;

вспомогательные генераторы (например, высокочастотные) для релейных и других вспомогательных цепей и устройств.

Ввиду очевидных различий в назначении генераторов каждой из перечисленных групп имеются существенные различия в требованиях к ним, в их характеристиках и схемах.

ГЕНЕРАТОРЫ МНОГОГОЛОСНЫХ ЭМИ

Как следует из функциональной схемы рис. 12 (гл. 2), в случае многоголосного ЭМИ обычно применяется блок из двенадцати генераторов, соответствующих диапазону высших тонов.

Практически частоты ведущих генераторов не опускаются ниже звука *до* третьей октавы (т. е. округленно — ниже 2 100 *гц*) и не поднимаются выше *ми* шестой октавы (т. е. 10 560 *гц*). В любом случае генераторы охватывают диапазон октавы без повторения крайнего звука, т. е. интервал септимы, а интервал смежных частот соответствует темперированному полутону.

Основные требования к таким генераторам следующие:

1) генераторы должны обладать долговременной стабильностью, обеспечивающей сохранение абсолютной частоты и соотношений частот темперированной шкалы. Эта стабильность должна сохраняться по крайней мере в условиях:

изменения температуры от 0 до +50° С;

изменения относительной влажности окружающего воздуха от 60 до 95%;

в течение времени не менее 1 месяца;

при перевозках инструмента городскими транспортными средствами в жесткой упаковке;

2) генераторы должны иметь средства вариации частоты для настройки и компенсации ухода частоты при длительном времени работы в пределах ±(1—2) %;

3) генераторы должны допускать модуляцию частоты с целью получения вибрации звука от специального источника напряжения (подтонального генератора) с девиацией до ±(3—4) %;

4) при необходимости обеспечить эффект глиссандо генераторы должны допускать, независимо от вибромодуляции частоты, параллельное для всех генераторов блока плавное смещение диапазона частот (вверх или вниз) не менее чем на 25%. При этом относительная дополнительная расстройка генераторов в режиме сдвига не должна превышать ±1,0%;

5) генераторы не должны быть чувствительны к внешним электрическим и магнитным полям частоты сети, которые могут вызывать косвенную модуляцию их частоты и в конечном итоге хриплость звука;

6) форма выходного напряжения генератора (или преобразователя напряжения, присоединенного к генератору) должна содержать участок высокой крутизны, чтобы обеспечить получение импульса необходимой полярности для запуска последующих октавных делителей частоты или преобразователей спектра колебаний.

Первое из этих требований — стабильность настройки — находится в известном противоречии с некоторыми последующими, а

именно с требованием возможности вибромодуляции и особенно с требованием обеспечения глиссандирования частоты. Поэтому практически приходится идти на компромисс и отдавать предпочтение тому требованию, которое в данном конкретном случае является решающим, и в зависимости от него выбирать схему и конструкцию генератора. Поскольку все же требование стабильности всегда остается весьма существенным, в зависимости от этого критерия схемы генераторов можно разбить на три класса:

I класс: генераторы-эталоны для инструментов с жесткой настройкой без вибрации звука с погрешностью частоты менее ±0,05% (менее ±1,0 цента; 1 цент=0,01 полутона);

II класс: генераторы средней стабильности для ЭМИ с вибрирующим звуком с погрешностью частоты в пределах менее ±0,25% (т. е. менее ±5 центов);

III класс: генераторы для инструментов с глиссандирующим звуком с погрешностью частоты в пределах до ±1,0% (или ±15 центов).

Нормы погрешности для генераторов III класса могут быть признаны удовлетворительными только при наличии средств быстрой и удобной корректировки — так, чтобы в продолжение одного концертного выступления могла быть обеспечена фактическая точность настройки по II классу. Для генераторов II класса обеспечение удобства и простоты подстройки блока также весьма существенно. В генераторах I класса при надлежащем выполнении нормы стабильности наличие средств оперативной подстройки не только несущественно, но даже может быть признано нежелательным, если не иметь в виду случая перестройки инструмента под нестандартный строй какого-либо специального ансамбля.

Поскольку диапазон частоты блока генераторов узкий и к генераторам в блоке предъявляются единые требования, все они осуществляются по одинаковой схеме для всех 12 тонов и отличаются только значениями электрических величин частотозадающих элементов. Для каждого класса точности имеется множество вариантов схем и конструкций генераторов, из которых выбирают нужные в зависимости от конкретных условий и стиля разработки.

На рис. 19 приведен один из возможных примеров решения для системы генератора I класса с использованием камертонного вибратора. Здесь камертон находится в режиме постоянного возбуждения за счет усилителя на транзисторах T_1 и T_2, на вход которого подается питающее напряжение от обмотки связанного с одним плечом камертона электромагнитного звукоснимателя M_1, а с выхода поступает напряжение положительной обратной связи на другое плечо камертона через электромагнитный возбудитель M_2. Камертон закреплен в массивном основании со скобой, верхние концы которой содержат стягивающий винт для регулировки магнитных зазоров M_1 и M_2. К выходу каскада T_2, кроме возбудителя камертона, подключен вход триггера Шмитта на транзисторах T_3 и T_4. Триггер обеспечивает преобразование напряжения на выходе T_2 с плавной огибающей в напряжение прямоугольной формы с крутизной фронта достаточной для запуска присоединяемой далее цепи октавных делителей частоты.

Частота колебаний и их стабильность в описанном генераторе в основном определяется непосредственно самим камертоном, его размерами и материалом, из которого он изготовлен. Наилучший материал для камертона—ферросплав элинвар, отличающийся чрез-

вычайно малым температурным коэффициентом линейного расширения, что обеспечивает весьма высокую стабильность частоты при изменении окружающей температуры. Для изготовления камертонов на повышенные частоты элинвар предпочтительней других сплавов, так как скорость распространения звука в нем очень высока.

В связи со специфическими физическими характеристиками элинвара механическая обработка его сопряжена с известными затруднениями и должна производиться на самых малых скоростях резания.

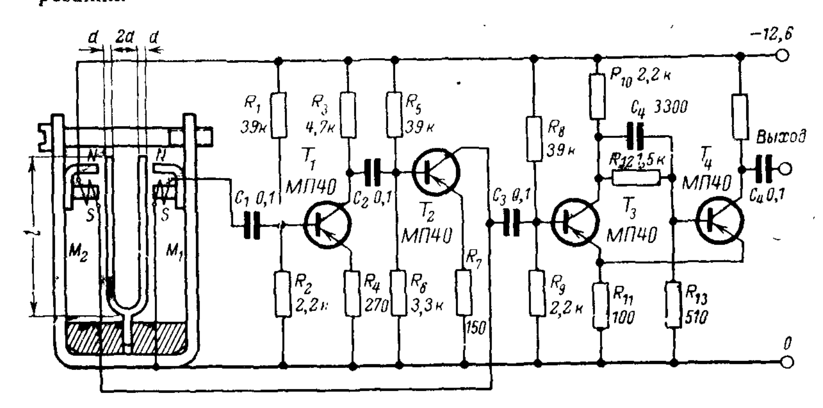


Рис. 19. Высокостабильный генератор I класса с камертонным вибратором для многоголосного ЭМИ.

Частота колебаний камертона в зависимости от геометрических размеров и свойств материала может быть определена по следующей формуле:

$$f_к = K\frac{d + 0,5}{(l + 3,8)^2}, \text{ гц}, \quad (1)$$

где d — толщина ветви в плоскости колебаний, *мм*;

$l_к$ — длина ветви от узла колебаний (места выхода ножки), *мм*;

K — коэффициент, зависящий от материала камертона и, в частности, равный: для элинвара 112 000 и для обычной стали — 818 000.

Так, частота колебаний камертона из элинвара с толщиной ветви 4,0 *мм* и длиной ветви 40,0 *мм* составит приблизительно 2,5 *кгц*. Этот пример показывает, что изготовление камертонов на частоты выше 5 *кгц*, очевидно, представляет трудности в смысле сохранения характерных геометрических соотношений вибратора данного типа.

Формула (1) объясняет также известное правило подгонки частоты камертона, согласно которому для повышения частоты необходимо спиливать плечи вилки по высоте, а для снижения частоты — по толщине.

Добротность камертона и, следовательно, стабильность его частоты определяется симметрией ветвей, что необходимо учитывать при их изготовлении. При симметричных ветвях в ножку камерто-

на передаются только волны сжатия, в то время как асимметрия приводит к возникновению поперечных волн в ножке, и следовательно, к значительному увеличению затухания.

Ширина ветвей камертона не влияет на частоту колебаний и определяется из условий перекрытия магнитных потоков звукоснимателя M_1 и возбудителя M_2, поля которых не должны непосредственно взаимодействовать, а должны замыкаться независимо друг от друга на соответствующие ветви вибратора. Чтобы определить отсутствие прямой связи M_1 и M_2, достаточно проверить систему на самовозбуждение в режиме заторможенного камертона

В качестве электромагнитных систем для M_1 и M_2 могут быть рекомендованы соответствующие системы миниатюрных телефонных капсюлей типа ТМ-4 с высокоомной обмоткой. При стандартной низкоомной обмотке их эффективное использование в генераторе, схема которого показана на рис. 19, требует применения согласующих трансформаторов с коэффициентом трансформации порядка 1 : 5, например, трансформаторов усилителей низкой частоты малогабаритных радиоприемников. В случае использования высокоомных головок увеличенного размера, таких, какие используются в головных телефонах типа Тон-2 или ТА-4, возбуждение камертона может быть получено даже с помощью более простой схемы, содержащей всего один усилительный каскад.

Магнитное поле головок M_1 и M_2 действует несколько сдерживающе на частоту колебаний камертона. Поэтому регулирование зазора между полюсами головок и концами вилки не только влияет на режим возбуждения, но и позволяет в небольших пределах (1—2 *гц*) управлять частотой вибратора. В связи с этим до установки камертона в возбудитель его следует настроить на несколько более высокую частоту, а систему регулировки зазора выполнять с высокой точностью, применяя плотно вращающиеся мелконарезные винты.

Блок камертонов следует помещать в звукопоглощающую оболочку, чтобы устранить гудение.

На рис. 20 представлена схема генератора II класса. Здесь применен обычный трехточечный возбудитель на транзисторе T_1. Для вибромодуляции частоты предусмотрен ввод модулирующего напряжения в качестве источника напряжения переменного смещения в базе транзистора возбудителя. Напряжение генератора через повторитель T_2 выводится на вход триггера Шмитта по схеме, аналогичной приведенной на рис. 19. В качестве индуктивного элемента контура L_1 может быть рекомендована катушка с броневым сердечником из карбонильного ферромагнетика, допускающего плавную перестройку по индуктивности путем ввертывания и вывертывания керновой шпильки на $\pm(3—4)\%$. Выбор карбонильных сердечников определяется тем, что температурный коэффициент магнитной проницаемости их составляет не более $50 \cdot 10^{-6}$ *ед/град*, в то время как для оксиферных сердечников тот же коэффициент равен $\pm(100—500) \cdot 10^{-6}$ *ед/град*, и потому они для генераторов данного типа непригодны.

Следует иметь в виду, что магнитная проницаемость сердечников от партии к партии и даже в пределах одной партии может изменяться в пределах $\pm 30\%$. Поэтому жестко определить необходимое число витков для получения заданной индуктивности не представляется возможным.

Можно применить метод разбраковки сердечников по эталонной катушке или разбраковку выполненных катушек с сердечниками по индуктивности при среднем положении настраивающего керна. На частоте 2—5 *кгц* следует применять сердечники типа Сб-5а, на более высоких частотах достаточную добротность обеспечат сердечники типа Сб-3а. Для сердечника Сб-5а (высота 30 *мм* и диаметр 34 *мм*) при обмотке из провода ПЭВ 0,18 *мм* с числом витков 1 250 можно считать, что будет получена величина индуктивности в среднем на уровне 0,05 *гн*. На частоте 5 *кгц* добротность такого контура будет иметь величину около 25.

Добротность катушки заметно уменьшается, если сечение окна обмотки используется неполностью, и этого следует избегать. Чтобы рассчитать число витков катушки по заданной индуктивности при наличии данных какой-либо катушки-образца на сердечнике того же типоразмера, можно использовать формулу

$$w_р = w_э \sqrt{\frac{L_р}{L_э}}, \qquad (2)$$

где $w_р$ — число витков рассчитываемой катушки; $L_р$ — индуктивность рассчитываемой катушки; $w_э$ — число витков известной катушки (эталона); $L_э$ — индуктивность известной катушки (эталона).

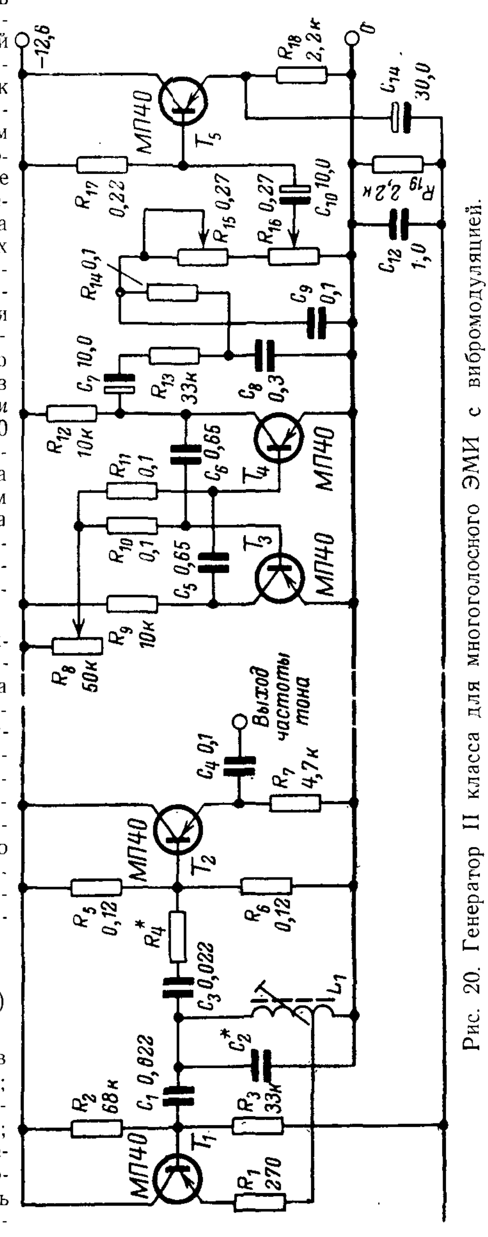


Рис. 20. Генератор II класса для многоголосного ЭМИ с вибромодуляцией.

Для выбранного сердечника диаметр провода, обеспечивающего необходимое и достаточное заполнение окна, может быть рассчитан по формулам

$$d_{\text{р}} = d_{\text{э}} \sqrt{\frac{w_{\text{э}}}{w_{\text{р}}}}, \tag{3}$$

или

$$d_{\text{р}} = d_{\text{э}} \sqrt[4]{\frac{L_{\text{э}}}{L_{\text{р}}}}, \tag{4}$$

где $d_{\text{р}}$ — диаметр провода рассчитываемой катушки;

$d_{\text{э}}$ — диаметр провода известной катушки (эталона).

Остальные обозначения соответствуют приведенным в формуле (2).

Чтобы устранить влияние внешних магнитных полей, а также взаимное влияние контурных индуктивностей генераторов друг на друга в блоке, необходимо их экранировать. Удовлетворительное экранирование обеспечивается при защите сердечника кольцевой оболочкой (без электрического шва) из алюминия толщиной в 2—3 *мм*. Внутренний диаметр оболочки должен быть на 5—6 *мм* больше диаметра сердечника, и свободное пространство нужно заполнить изоляционным материалом (например, залить его компаундом). При наличии экранов взаимоиндукция расположенных рядом катушек в броневых сердечниках снижается в 20—30 раз. Применение кольцевого экрана снижает индуктивность катушки с таким сердечником на 3—5% и добротность — на 10—20%.

Чувствительность генератора к вибромодуляции находится в зависимости от добротности контура, которая, с другой стороны, определяет стабильность частоты. Практически добротность контура целиком определяется добротностью катушки с сердечником, так как потери в конденсаторе контура относительно малы (не превосходят 5—10% от потерь в катушке). Поэтому выбор типа сердечника и обмотки представляет известный компромисс в решении, отвечающем требованиям стабильности и виброчувствительности генератора.

Близкий к этому компромисс — по тем же причинам — представляет и выбор коэффициента связи контура с базой транзистора возбудителя. Если выбраны типоразмер сердечника и число витков катушки в целом, то можно рекомендовать подбирать оптимальный коэффициент связи в схеме возбудителя, приготовив для этого катушку с несколькими отводами для связи в пределах от 0,2 до 0,5 (например, ступенями по 5—10% полного числа витков). При этом необходимо обеспечить возможность:

а) измерять изменение частоты генератора в зависимости от изменения напряжения питания возбудителя в режиме отсутствия вибромодуляции;

б) определять эффект вибромодуляции при заданной величине напряжения вибромодуляции и неизменном (оптимальном) напряжении питания.

При всех условиях в рабочем режиме питание генераторов должно быть обеспечено от стабилизированного источника.

В качестве дополнительного средства температурной стабилизации генератора можно использовать компенсацию температурного коэффициента индуктивности (в основном — магнитной проницаемости сердечника) путем подбора равного по величине, но обратного по знаку температурного коэффициента емкости контура, для чего

могут быть применены керамические конденсаторы соответствующих типов и групп ТКЕ. Чтобы обеспечить компенсацию, а также точно подобрать величину емкости контура, следует практически в схеме генератора применить в качестве емкости C_2 три конденсатора, соединенных параллельно: $C_{2\text{-}1}$ — основной конденсатор (около 70—80% полной емкости) с малым температурным коэффициентом; $C_{2\text{-}2}$ — добавочный конденсатор специального типа для компенсации термонестабильности контура и генератора в целом; $C_{2\text{-}3}$ — регулировочный конденсатор (5—10% полной емкости) для установки заданной частоты при среднем положении регулировочного керна сердечника катушки.

Дополнительно улучшить температурную стабильность генератора можно, применяя в возбудителе кремниевый транзистор.

Из элементов схемы, требующих определенного выбора, следует еще отметить конденсатор C_1. Если величина его емкости недостаточна, то ухудшается форма, снижается амплитуда и стабильность частоты колебаний. При избытке емкости возникает прерывистая генерация (типа блокинга) с частотой прерываний, определяемой постоянной времени цепи утечки базы T_1 и разделительного конденсатора C_1.

Один из наиболее важных этапов отладки генератора — проверка его стабильности. Наиболее доступно и точно определить на слух малые отклонения частоты генератора от первоначального значения, установленного по унисону и эталонам, можно, применяя калиброванный подстроечный конденсатор. Для этого параллельно емкости колебательного контура генератора включают отградуированный в пикофарадах подстроечный конденсатор, а генератор через усилитель включают на громкоговоритель малой мощности.

Вначале генератор настраивают под эталон, в качестве которого может быть использован камертон, пианино или стабильный электрический генератор. В последнем случае сравнивать частоту испытуемого генератора с эталоном можно по фигуре Лиссажу на экране осциллографа. Конденсатор колебательного контура ставят в среднее положение, и отметка среднего положения принимается за нулевую. Если возникает расстройка, которая появляется, например, при изменении режима генератора, ее компенсируют подстроечным конденсатором и по знаку компенсации определяют знак ухода частоты. Относительное изменение частоты для генераторов с контуром типа LC рассчитывается по формуле

$$\frac{\Delta f}{f_0} = -\frac{\Delta C}{2C_0}100\,(\%), \qquad (5)$$

где Δf — уход частоты генератора за счет дестабилизирующего фактора;

f_0 — начальная частота (и частота эталона);

ΔC — значение емкости триммера, введенное для компенсации ухода частоты;

C_0 — полная начальная емкость контура.

На схеме рис. 20 представлен также генератор вибрато (подтональной вибрации) на транзисторах T_3 и T_4 и его выходной усилитель на транзисторе T_5.

К генератору вибрато предъявляется обычно требование работы в диапазоне от 4 до 7 *гц* при обеспечении в этом диапазоне плавно-

регулировки частоты и амплитуды на его выходе. Наиболее употребительной частотой вибрато обычно считается частота в 6 *гц*. Возможность изменения частоты вибрации и ее интенсивности (вплоть до полного исключения) — необходимое условие использования для исполнения музыки различного содержания и стиля. Важным признаком хорошего вибрато служит симметрия девиации (отклонения) тональной частоты при вибромодуляции относительно среднего значения, так как асимметричная девиация вызывает ощущение изменения средней высоты тона. Другой важный признак — особенно при большой интенсивности вибрации — плавность огибающей ее напряжения.

Подтональный генератор на рис. 20 собран по схеме симметричного мультивибратора, в котором необходимое изменение частоты достигается с помощью единственного резистора — переменного сопротивления R_7, включенного в качестве общей базовой утечки транзисторов T_3 и T_4. При таком управлении частотой симметрия колебаний мультивибратора сохраняется во всем необходимом диапазоне. Для сглаживания формы волны на выходе мультивибратора включен двухзвенный фильтр $R_{12}C_8$, $R_{13}C_9$ *.

Установка интенсивности вибрации (вплоть до ее исключения) осуществляется с помощью потенциометра R_{15}. Кроме того, предусмотрен резистор R_{14}, действующий совместно с регулятором уровня громкости и притом так, что при изменении громкости от пиано к форте интенсивность вибрации плавно увеличивается в 1,5—2 раза. Изменение интенсивности вибрации в зависимости от громкости существенно повышает ее выразительное значение и усиливает впечатление от форте, придавая ему более напряженный и яркий характер.

Генератор вибрато — общий для всех двенадцати тональных генераторов. Чтобы устранить связь тональных генераторов через цепь вибромодуляции, ее выходное сопротивление должно быть возможно более низким. С этой целью выход подтональной частоты с движка потенциометра R_{15} на шину вибромодуляции генераторов осуществляется через повторитель на транзисторе T_5, а выход повторителя заблокирован конденсатором C_{12}, имеющим достаточно низкое реактивное сопротивление для тональных частот.

Помимо описанной выше системы частотной вибромодуляции, существуют различные системы вибрато по фазе, амплитуде и системы тремоло, в основе которых содержится подтональный генератор, аналогичный описываемому. Из-за ограниченности объема книги эти системы здесь не рассматриваются.

Следует также отметить, что все системы автоматического (непрерывного и стабильного по режиму) вибрато, за исключением тех случаев, когда их специфический характер требуется для подчеркивания особого жанра звучания, не отвечают высоким требованиям подлинно выразительного исполнения музыки и в этом отношении уступают системам исполнительного (волевого) вибрато, одна из которых будет описана ниже. Тем не менее как средство окраски звука, автоматическое вибрато имеет определенные права на существование.

---

* Чтобы получить синусоидальное напряжение подтональной частоты, весьма подходит схема генератора с фазосдвигающей цепочкой RC. Однако изменение частоты в таком генераторе в достаточно широких пределах требует использования сдвоенных или строенных резисторов переменного сопротивления.

На рис. 21 приведена схема генератора III класса многоголосного ЭМИ, позволяющая осуществить эффект глиссандо (скольжение звука по высоте). В качестве генератора использован симметричный мультивибратор на транзисторах T_1 и T_2, допускающий управление частотой за счет изменения смещения на базах транзисторов. Стабильность частоты в таком генераторе определяется следующими важными условиями:

стабильностью питающего напряжения;

полной симметрией схемы, включая симметрию транзисторов по коэффициенту усиления, обратному току коллектора и по изменению этих параметров при изменении температуры;

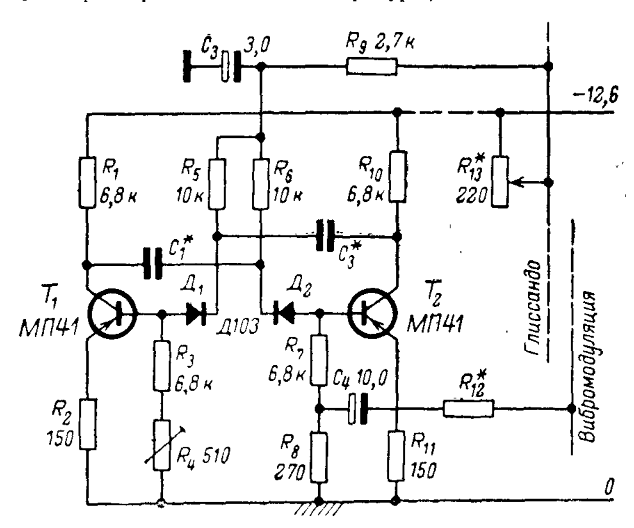


Рис. 21. Генератор III класса, допускающий глиссандо.

использованием дополнительных диодов $Д_1$ и $Д_2$ базовых цепей с малым обратным током;

использованием средств компенсации ухода частоты при изменении температуры.

Частоту генерации устанавливают подбором емкости конденсаторов C_1 и C_3 с соблюдением симметрии. При прочих данных элементов, приведенных на рис. 21, частота приблизительно будет определяться выражением

$$f = \frac{17}{C}, \text{ гц}, \qquad (6)$$

где $C = C_1 = C_3$, *мкф*.

Точное значение частоты устанавливается с помощью регулировочного резистора R_4, который при подгонке емкости конденсаторов ставят в среднее положение.

Напряжение подтональной вибрации подается на базу транзистора T_2 через вспомогательную цепь R_{12}—C_4—R_8. Чувствительность

мультивибратора к асимметричной модуляции на базе транзистора очень высока, поэтому значение напряжения вибромодуляции для данной схемы должно быть значительно меньше, чем в случае схемы рис. 20. Необходимое ограничение наибольшей девиации достигается подбором величины R_{12}. Схема генератора вибрато в этом случае ничем не отличается от схемы, приведенной на рис. 20.

Эффект глиссандо (на понижение) достигается изменением напряжения питания цепи баз транзисторов T_1 и T_2 через резисторы R_5 и R_6 и индивидуальные развязки C_2R_9, устраняющие взаимодействие генераторов блока в режиме глиссандо. Регулятор глиссандо R_{13} — общий для всех двенадцати генераторов. Нормально он полностью выведен, так что шина напряжения глиссандо находится под полным напряжением питания схемы. При увеличении сопротивления резистора R_{13} частоты всех генераторов своевременно и плавно снижаются. Диапазон смещения тонов определяется величиной наибольшего сопротивления R_{13}. Чем больше диапазон глиссандирования, тем больше вероятность относительной расстройки (расхождения) генераторов в режиме глиссандо. Сопряжение настройки генераторов при предельном понижении частоты может быть достигнуто индивидуальным подбором резисторов R_9.

Напряжение генератора может быть выведено с коллектора любого плеча через повторитель путём непосредственного присоединения базы повторителя к коллектору транзистора, входящего в плечо транзистора. Сопротивление нагрузки повторителя при этом должно быть порядка 10 *ком*.

НАСТРОЙКА ГЕНЕРАТОРОВ ПО ЧАСТОТАМ ХРОМАТИЧЕСКОЙ ГАММЫ

В заключение необходимо кратко остановиться на способах настройки генераторов по частотам хроматической гаммы. Такая настройка представляет известные трудности ввиду иррациональных соотношений частот темперированной музыкальной шкалы. Предварительную настройку генераторов с точностью до ± (0,5—1) % можно осуществить, используя в качестве эталона стандартный лабораторный генератор звуковых частот, сравнивая частоты по фигуре Лиссажу на экране осциллографа, или, в крайнем случае, на слух по биениям.

Наиболее удобным современным способом точной настройки генераторов тона следует признать способ определения частоты генерации с помощью цифрового частотомера, дающего возможность получить практически любую точность замера частоты. К сожалению, ввиду большой стоимости такого частотомера его применение возможно практически лишь в условиях серийного производства ЭМИ или в условиях крупной лаборатории.

В эксплуатационных условиях и условиях домашней «лаборатории» можно рекомендовать точную настройку ЭМИ на слух по биениям с применением эталонов музыкальных звуков, включая какие-либо готовые музыкальные инструменты с достоверным строем.

В тех случаях, когда требуется осуществить точную настройку всех двенадцати тонов при наличии всего одного эталона, например, камертона в тоне *ля*, необходимо применить классическую систему так называемого квинтового круга. Система основывается на том, что интервал темперированной квинты несколько меньше интервала натуральной квинты, и его можно установить на слух по биениям,

если предварительно два тона были точно настроены на натуральную квинту, в которой биения отсутствуют. При последовательном сравнении пар тонов по квинтам все различные тоны хроматической гаммы обходят как бы по кругу, так как после двенадцатого шага квинтовых сравнений в качестве тринадцатого тона оказывается исходный тон, от которого для уточнения первоначальной настройки обход можно повторить.

Практически при сравнении тонов в удобном для точного отсчета биений диапазоне приходится прибегать к октавному переносу тонов, так что некоторые пары тонов оказываются сопоставленными не в квинту, а в ее обращенный интервал — кварту, которая в темперированной шкале несколько шире, чем в натуральной. Поэтому при сравнении тонов в кварту подстраиваемый тон необходимо двигать по частоте в сторону расширения интервала предварительно установленной натуральной кварты.

Таблица 3

Порядок настройки тонов по ступеням нисходящего квинтового круга

№ хода в квинтовом круге	Настраиваемый тон		Частота темперированного тона, *гц*	Количество биений при настройке в темперированный интервал с предшествующим тоном
	слоговое обозначение	буквенное обозначение		
0	*ля*	a^1	440,0	0, 0 (настройка в унисон с эталоном)
1	*ре*	d^1	293,66	0,98 в 1 *сек* (или ~10 за 10 *сек*)
2	*соль*	g^1	392,00	1,36 в 1 *сек* (иля ~14 за 10 *сек*)
3	*до*	c^1	261,63	0,89 в 1 *сек* (или ~9 за 10 *сек*)
4	*фа*	f^1	349,23	1,17 в 1 *сек* (или ~12 за 10 *сек*)
5	*ля диез* / *си бемоль*	ais^1 / b^1	466,16	1,56 в 1 *сек* (или ~15 за 10 *сек*)
6	*ре диез* / *ми бемоль*	dis / es^1	311,13	1,07 в 1 *сек* (или ~11 за 10 *сек*)
7	*соль диез* / *ля бемоль*	gis / as	415,30	1,38 в 1 *сек* (или ~14 за 10 *сек*)
8	*до диез* / *ре бемоль*	cis^1 / des^1	277,18	0,96 в 1 *сек* (или ~10 за 10 *сек*)
9	*фа диез* / *соль бемоль*	fis^1 / ges^1	369,99	1,25 в 1 *сек* (или 25 за 20 *сек*)
10	*си*	h^1	493,88	1,68 в 1 *сек* (или ~17 за 10 *сек*)
11	*ми*	e^1	329,66	1,22 в 1 *сек* (или ~12 за 10 *сек*)
12	*ля*	a^1	440,0	1,36 в 1 *сек* (или ~27 за 20 *сек*)

Обход тонов по квинтовому кругу может быть выполнен в направлении «вверх» и «вниз» от любого исходного тона. Биения темперированных интервалов можно отсчитывать, применяя секундомер. Наиболее удобный диапазон тонов, в котором биения легко отсчитываются — это диапазон первой октавы. Следовательно, точную настройку ведущих генераторов этим способом нужно производить в готовом инструменте с использованием октавных делителей частоты. При этом следует иметь в виду, что слышимость биений зависит от спектрального состава звука. В частности, нечетный спектр октавных делителей частоты не содержит второй и четвертой гармоник, необходимых для образования биений в интервалах квинты (3/2) и кварты (4/3) и потому сам по себе (без преобразования) в данном случае непригоден.

Данные для настройки шкалы тонов по квинтовому кругу в направлении «вниз» приведены в табл. 3. При установке частоты генераторов по данным табл. 3 их расстройка от натурального интервала для приближения к темперированному должна производиться в направлении повышения частоты. В последней позиции круга (12) отсчет биений с предыдущим тоном должен одновременно подтверждать настройку в унисон с эталоном, выполненную в исходной позиции (0).

ВЕДУЩИЕ ГЕНЕРАТОРЫ МЕЛОДИЧЕСКИХ ЭМИ

Требования к ведущим генераторам мелодических инструментов значительно сложнее требований, предъявляемых к генераторам, описанным в предыдущем разделе. Усложнение требований обусловлено тем, что генератор мелодического ЭМИ работает в относительно широком непрерывном диапазоне, и в этом диапазоне должно быть обеспечено как плавное, так и любое скачкообразное изменение рабочей частоты на любой необходимый интервал. Перестройка должна обеспечиваться средствами, отвечающими «технологии» музыкального исполнительного искусства, т. е. не требовать никакого времени, кроме времени, отвечающего скорости движения виртуозно развитых пальцев музыканта. Поэтому с музыкальной стороны построение схемы генератора определяется выбором системы управления высотой звука.

Наиболее высокие требования, отвечающие высокой интонационной выразительности мелодии, могут быть принципиально удовлетворены в случае применения датчика высоты тона в форме грифа, аналогичного грифу смычковых инструментов. Такая система может обеспечивать скачкообразное и плавное изменение высоты звука, вибрацию звука при колебательном движении пальцев, а также свободное интонирование, т. е. установку высоты тонов с сознательным отступлением от темперированного строя в связи с ладовыми и другими особыми условиями изложения мелодического (звуковысотного) рисунка. На практике, однако, применение грифа вызывает много трудностей, связанных как с выполнением системы, так и с ее применением в чисто музыкальном плане. Возможность свободного интонирования на грифе — это одновременно и его недостаток: для получения точной интонации требуется очень точно располагать пальцы на грифе, что связано с очень высокими и постоянно тренируемыми навыками при поддержке хорошо развитого музыкального слуха. Поэтому в малоопытных руках гриф свободной интонации превращается в источник многочисленных ошибок, часто

более существенных для музыкального впечатления, чем предполагаемый выигрыш от свободного интонирования.

В классических смычковых инструментах это противоречие несколько смягчено в связи с наличием опорных точек интонации на открытых струнах и хорошо разработанной системой позиций.

По этим причинам, если не рассматривать инструменты, предназначенные для исполнителей высокого концертного класса, следует признать желательным применение для мелодических ЭМИ не грифа (в его электрическом эквиваленте), а обычной диатонической клавиатуры с тем или иным контактным устройством под клавишами.

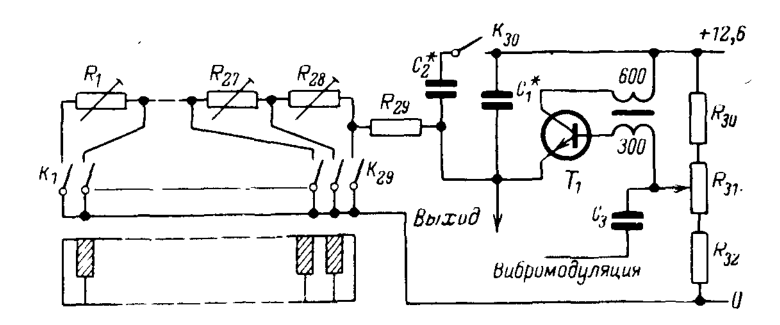


Рис. 22. Простейший ведущий генератор мелодического ЭМИ.

На рис. 22 приведена простейшая схема такого рода, которую, однако, следует рассматривать скорее как иллюстрацию принципа действия генератора мелодического ЭМИ, а не как пример типичного решения. Здесь клавиатура содержит серию подклавишных контактов K_1—K_{29}, соединенных с цепью резисторов R_1—R_{28} (предполагается, что в данном случае клавиатура имеет 29 клавишей). Эти резисторы совместно с постоянно включенным резистором R_{29} входят в цепь заряда конденсатора C_1 блокинг-генератора на транзисторе T_1 и трансформаторе.

Частота самого высокого тона, получающаяся при замыкании контакта K_{29}, определяется характеристиками транзистора T_1 трансформатора $Тр_1$, величиной емкости конденсатора C_1 и сопротивления R_{29}, а также начальным смещением на базе транзистора T_1, устанавливаемым потенциометром R_{31}. Этот потенциометр служит органом общей подстройки генератора. Изменение (понижение) генерируемой частоты происходит при включении в цепь R_{29} резисторов клавиатуры — с R_{28} до R_1. При этом велнчина сопротивления каждого из этих резисторов должна устанавливаться такой, чтобы обеспечить понижение частоты точно на пол-тона хроматической шкалы для смежной клавиши. Очевидно, что для нижайшего тона (когда замкнут контакт K_1) в цепи заряда конденсатора C_1 действует суммарное сопротивление R_1—R_{29}. При нажатии любой клавиши будет действовать сумма сопротивлений тех резисторов, которые входят в зарядную цепь, справа от замкнутого контакта. Если одновременно нажать две клавиши и более, действующее значение сопротивления зарядной цепи определится клавишей наибольшей высоты звука, как если бы она была единственно нажатой. Таким образом, осуще-

ствляется принцип «выбирания» высоты звука, аналогично тому, как это происходит для струнных инструментов грифового типа.

Схема рис. 22 обеспечивает возможность получения вибрато в случае ввода напряжения вибромодуляции на базу транзистора T_1. С помощью дополнительного конденсатора C_2, включаемого отдельным контактом K_{30}, можно сместить диапазон звучания на фиксированный интервал, например на октаву или интервал, необходимый для исполнения партии транспонирующего инструмента (in B, in A и т. п.).

Описанная схема обеспечивает только весьма примитивное мелодическое движение звука по хроматическим ступеням, достаточное лишь в отдельных случаях простейшей трактовки мелодического рисунка или в таких особых случаях, как исполнение басовой партии. Для выразительного мелодического исполнения необходимо наличие средств исполнительской пальцевой вибрации и исполнительски применяемых средств плавного перехода по высоте звука.

С учетом обеспечения плавного перехода по высоте (наряду со ступенчатым переходом), а также в связи с особым требованием консервации частоты генератора, которое расшифровывается ниже, необходимо применить управление частотой генератора с помощью вакуумной электронной лампы, изменяя напряжение смещения на ее сетке. При этом возникает необходимость обеспечить высокую стабильность анодного тока управляющей лампы для всех его различных уровней, соответствующих различным частотам диапазона генератора.

Требование стабильности тока управляющей лампы удовлетворить тем труднее, чем шире диапазон генератора. Поэтому помимо соображений, связанных с габаритами клавиатуры, непрерывный диапазон мелодического ЭМИ желательно по возможности ограничить, расширяя его при необходимости путем введения октавных регистров, формируемых бинарными делителями частоты.

Специфической особенностью генератора мелодического ЭМИ является некоторая нестабильность частоты при мгновенном переходе в большом частотном интервале. Изменение режима элементов схемы при резком и большом изменении частоты может приводить к постепенному сползанию частоты, например, очень высокого звука, взятого непосредственно после очень низкого звука, и наоборот. Поэтому интонация звуков в скачкообразном мелодическом движении может быть неточной. В связи с этим кроме определения статической погрешности частоты генератора в различных частях диапазона, связанной с изменением напряжения питания, колебанием внешней температуры, самопрогревом генератора с момента включения, необходимо определить динамическую погрешность частоты при скачке от минимальной частоты диапазона к максимальной и обратно относительно статической (выдержанной) частоты настройки данного тона.

На рис. 23 приведена полная схема ведущего генератора мелодического инструмента, в значительной мере удовлетворяющая всем рассмотренным требованиям.

Здесь высоту звука задает система, состоящая из источника постоянного напряжения +50 *в* и реостата R_2, нагруженного на сопротивление резистора R_1. Действующая величина сопротивления реостата R_2 устанавливается клавиатурой посредством подклавишных контактов K_1—K_{41}, замыкающихся на сборную шину, расположенную на подклавишной рейке P_1. Реостат имеет ползунки для

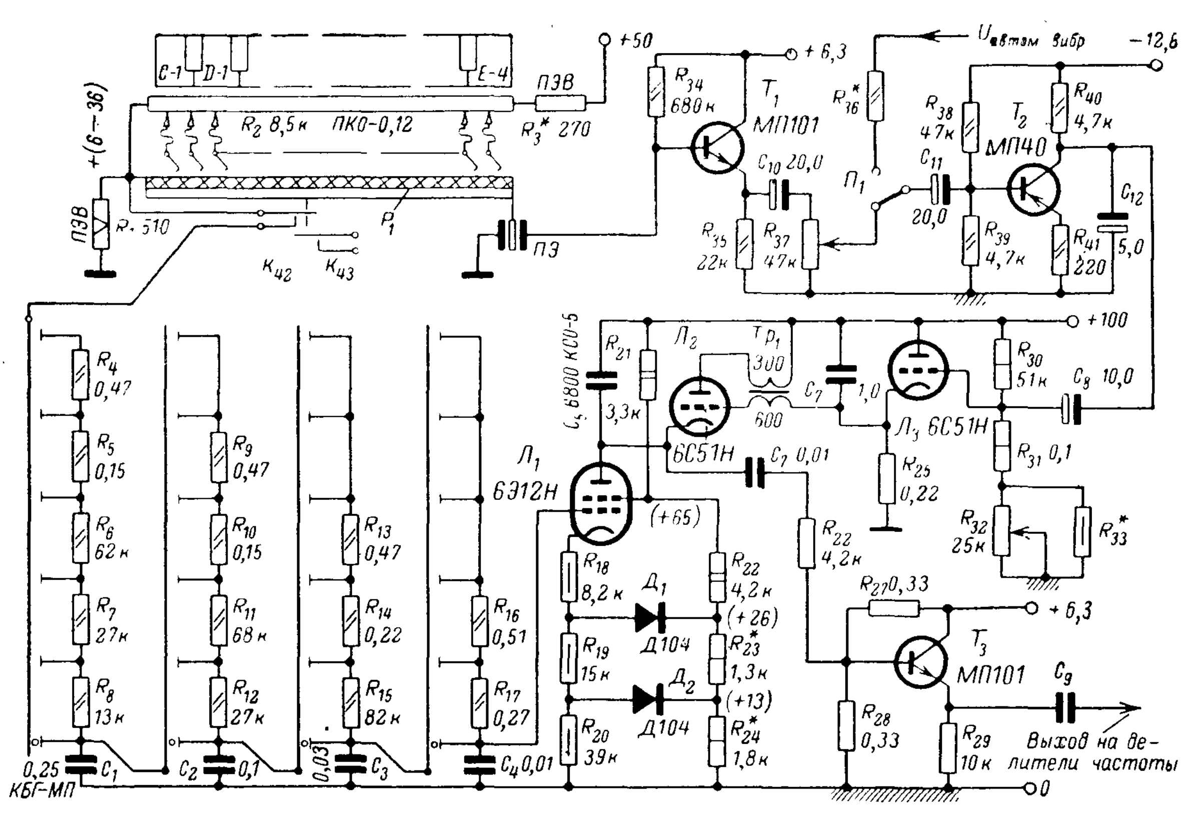


Рис. 23. Полная схема ведущего генератора мелодического ЭМИ.

каждого из контактов K_1—K_{41}, позволяющие установить точную величину сопротивления реостата R_2 для каждого значения высоты звука в диапазоне клавиатуры. Ползунки соединяются с контактами индивидуальными гибкими проводниками. Таким образом, на R_1 образуется напряжение определенной величины для каждой высоты звука (для каждой нажатой клавиши), которое, как будет объяснено ниже, и есть управляющее для частоты ведущего генератора. Как и в случае схемы рис. 22, при одновременном нажатии двух и более клавишей, действующее значение сопротивления реостата R_2 определяется клавишей для наибольшей высоты звука, как если бы она была единственно нажатой.

Управляющее напряжение с R_1 через контакт K_{42} подклавишной рейки P_1 поступает в интегрирующий фильтр (R_4—R_{15}) (C_1—C_4), предназначенный для образования на его выходе плавного перехода управляющего напряжения при скачкообразном изменении этого напряжения на R_1, т. е. для получения скользящего перехода по высоте звука (глиссандо) [1]. Постоянная времени интегрирующего фильтра имеет ступенчатое управление с помощью четырехсекционного контактора, связанного с педальным приводом [2]. В исходном положении фильтр замкнут и управляющее напряжение на выходе фильтра (т. е. на C_4) полностью соответствует по форме напряжению на входе (на C_1). По мере ввода секций резисторов R_8—R_{12}—R_{15}—R_{17}, R_7—R_{11}—R_{14}—R_{16} и т. д. постоянная времени фильтра нарастает, так что наибольшее значение ее обеспечивает время перехода порядка 1 *сек*.

Еще более медленный переход может быть получен, если действие фильтра сочетается с медленным хроматическим движением пальцев на клавишах.

При формировании относительно быстрых плавных переходов в фильтре действуют четыре интегрирующие ячейки, что обеспечивает приблизительно симметричное сглаживание начальной и конечной фаз переходного процесса. При формировании более длительных переходов с целью ограничения переходного сопротивления количество действующих ячеек фильтра автоматически сокращается до трех и двух за счет нулевого сопротивления секций, следующих за R_{13} и R_{16}.

Управляющее напряжение с C_4 подается на первую сетку тетрода $Л_1$. Анодный ток тетрода служит зарядным током для конденсатора C_5, входящего в схему блокинг-генератора, куда входит также триод $Л_2$ и трансформатор $Тр_1$. Блокинг-генератор собственно и есть ведущий генератор мелодического ЭМИ. Частота его колебаний при прочих равных условных определяется скоростью заряда конденсатора C_5, т. е. величиной анодного тока $Л_1$. При приведенных на рис. 23 данных элементов схемы анодный ток $Л_1$ в полном диапазоне клавиатуры (три октавы с большой терцией) изменяется в пределах от 0,15 до 1,5 *ма*, что приводит и к изменению частоты генератора в пределах от 1 до 10 *кгц* (округленно). Напряжение звуковой частоты с выхода генератора (анод $Л_1$ — катод $Л_2$) через буферный каскад на транзисторе T_3 подается на бинарные делители частоты, с помощью которых формируются октавные регистры инструмента с диапазонами, соответствующими указанному выше диапазону клавиатуры от нижнего *до* до верхнего *ми*. Параллельный

[1] Авторское свидетельство № 72.652.

[2] Авторское свидетельство № 129.477.

сдвиг частоты генератора для подстройки к эталону и вибромодуляция достигаются путем изменения начального смещения на сетке триода $Л_2$. Ввиду того что в режиме блокинг-генерации ток сетки $Л_2$ имеет относительно большую среднюю величину и импульсный характер, начальное смещение на сетке $Л_2$ стабилизировано конденсатором C_6 и подается на сетку $Л_2$ через катодный повторитель на триоде $Л_3$. Начальное напряжение на сетку триода $Л_3$ поступает с делителя R_{30}—R_{31}, величина тока в котором в пределах, необходимых для подстройки генератора к эталону высоты, регулируется резистором R_{32}.

Стабильность лампы $Л_1$ обеспечивается глубокой отрицательной обратной связью, осуществляемой катодными резисторами R_{18}, R_{19} и R_{20}. Так как анодный ток $Л_1$ меняется в относительно широких пределах, то обеспечить оптимальный режим этой лампы для наибольших и наименьших значений тока с помощью всего одного резистора в катодной цепи невозможно. Сопротивление резистора, выбранное из условий достаточной стабилизации лампы при малых токах, оказывается чрезмерным при больших токах.

В схеме рис. 23 резисторы R_{18}—R_{20} образуют общее сопротивление обратной связи в режиме малых анодных токов. С увеличением катодного тока лампы $Л_1$, когда напряжение на R_{20} достигает величины напряжения на относительно низкоомном резисторе R_{24} (в цепи делителя напряжения R_{21}—R_{24}), оно через диод $Д_1$ практически выключается из катодной цепи лампы $Л_1$, так как с достижением упомянутого уровня напряжения катодный ток начинает проходить не по цепи R_{20}, а по низкоомной цепи R_{24}. Таким образом, в области средних величин анодного тока лампы $Л_1$ в ее катодной цепи действует уменьшенное значение сопротивления обратной связи, составленное из суммы сопротивлений резисторов R_{18}, R_{19} и R_{24}, и поэтому приращение падения напряжения в катодной цепи по мере увеличения напряжения на сетке происходит с меньшей крутизной.

В режиме повышенных токов лампы $Л_1$ происходит второй этап отключения части катодного сопротивления: катодный ток проходит по цепи R_{18} через диод $Д_1$ и через относительно низкоомную цепь R_{23}—R_{24}. Точки переключения резисторов в цепи катода в правильно отрегулированной схеме должны соответствовать примерно 1/3 и 2/3 полного диапазона тока в масштабе высоты звука. Такая регулировка позволяет не только создать условия для оптимальной катодной противосвязи зарядной лампы по току, но и приблизить к линейной зависимость действующего сопротивления подклавишного реостата R_2 от высоты звука. (Схему нелинейной катодной обратной связи применительно к зарядной лампе генератора ЭМИ разработал инженер Б. З. Кац).

В схеме рис. 23 показаны также каскады, относящиеся к схеме генератора вибрато. Напряжение вибромодуляции с выхода усилительного каскада на транзисторе T_2 через конденсатор C_8 подается на сетку катодного повторителя $Л_3$. На входе усилительного каскада (T_2) имеется переключатель $П_1$ рода вибрации. По цепи с резистором R_{36} на вход этого каскада может быть подано напряжение подтональной частоты автоматического вибрато от генератора, аналогичного описанному в связи со схемой рис. 20. В другом положении переключателя $П_1$ на базу транзистора T_2 через каскад на транзисторе T_1 подается напряжение от пьезокерамического элемента $ПЭ_1$, связанного с подклавишной рейкой. При вибрации пальцев на клавишах, опущенных на рейку, она в случае упругого закрепления

передает вибрационное движение на элемент $ПЭ_1$, который преобразует его в соответствующее напряжение для вибромодуляции генератора [1].

Система пальцевой вибрации передает звуку все оттенки вибрационного движения пальцев, что и создает ее отличия и особенности применения для музыканта.

Подреечные контакты $К_{42}$ и $К_{43}$ должны срабатывать при опускании любой клавиши, для чего, в свою очередь, должно быть обеспечено опускание рейки при нажатии на нее любой опущенной клавиши.

Контакты $К_{43}$ служат для запуска схемы формирования амплитудной огибающей звука, некоторые варианты которой описаны в гл. 5.

Контакты $К_{42}$, как было ранее отмечено, замыкают цепь подачи управляющего напряжения с R_1 на схему управляющей сетки зарядной лампы $Л_1$. При снятии пальцев с клавишей контакты $К_{42}$ и $К_{43}$ размыкаются. Так как обычно бывает необходимо обеспечить плавное затухание звука при его окончании (хотя бы в течение относительно короткого времени), должна сохраняться частота генератора, соответствующая заканчивающемуся звуку. При разрыве контактов $К_{42}$ цепь сетки лампы $Л_1$ оказывается изолированной от схемы подачи управляющего напряжения и подсоединенной к конденсаторам C_1—C_4, которые при этом сохраняют некоторое время напряжение, соответствующее последней нажатой клавише и, таким образом, «консервируют» генератор на частоте последнего звука (напряжение на сетке зарядной лампы остается при этом неизменным [2]).

Такой эффект возможен постольку, поскольку токи сетки лампы $Л_1$ ничтожны, что в действительности обеспечивается в выбранном режиме схемы. Качество консервации генератора по управляющему напряжению определяется также качеством изоляции внешней сеточной цепи $Л_1$, на что необходимо обращать внимание при конструктивном осуществлении генератора.

Есть и еще одно необходимое условие получения высококачественной консервации: выбор типа конденсаторов C_1—C_4, которые не должны иметь ярко выраженного эффекта диэлектрической абсорбции. При диэлектрической абсорбции часть заряда конденсатора как бы «впитывается» в его диэлектрик в течение некоторого времени (примерно в продолжение 1 *сек* после подачи заряжающего напряжения). Если схема ведущего генератора собрана по рис. 23 и при игре «стаккато» время заряда конденсаторов было ограничено, их заряд после изоляции от заряжающей цепи начинает «впитываться» в диэлектрик и напряжение на обкладках конденсаторов падает, что вызывает эффект непроизвольного и нежелательного глиссандирования звука при его окончании (в процессе концевого затухания). С учетом описанного явления приходится ограничить выбор конденсаторов в цепи консервации бумажными с накладными электродами и слюдяными. Малогабаритные керамические и металлобумажные конденсаторы (с электродами, выполненными методом вакуумного напыления) для данной схемы непригодны.

Для стабильной работы генератора в целом необходимо обеспечить хорошую стабилизацию всех питающих напряжений. Во избежание хриплости тона, которая появляется из-за модуляции на час-

---

[1] Авторское свидетельство № 126.354.
[2] Авторское свидетельство № 69.235.

тоте сети переменного тока, фильтрация выпрямленного напряжения должна быть жесткой. Необходимо также предусмотреть экранирование от внешних магнитных полей трансформатора $Тр_1$, который в свою очередь может быть источником наводок на индуктивные элементы тембрового блока и усилителя низкой частоты, что приводит к «просачиванию» звука в паузах.

Питание накала ламп следует осуществлять от стабилизированных источников низковольтных (транзисторных) участков схемы.

Глава четвертая

ДЕЛИТЕЛИ ЧАСТОТЫ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СПЕКТРА

НАЗНАЧЕНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СПЕКТРА И ЧАСТОТНЫХ ДЕЛИТЕЛЕЙ

Первое звено преобразования тембра звука в ЭМИ — это, как правило, преобразователь спектра датчика тона. Только в простейших ЭМИ спектр задающего генератора служит тембровой основой звука. В большинстве же случаев, поскольку исходные колебания подвергаются многократным преобразованиям, этот спектр свое значение для тембра утрачивает.

Как ясно из функциональных схем, приведенных в гл. 2 (см. рис. 12 и 15), в ЭМИ широко применяются делители частоты. Наиболее употребительны делители с коэффициентом 2, которые обеспечивают октавное понижение тонов. В существующих многочисленных ЭМИ типа орга́на такие делители часто являются единственным источником каждого тона. При этом делитель одновременно служит и датчиком спектра, определяющим тембр сигнала данного тона. Таким образом, делитель — один из типов элементарных преобразователей спектра.

Ввиду специфичности состава спектра октавного делителя, не содержащего четных гармоник, такой вид спектра для получения нужного тембра далеко не всегда желателен. Поэтому предусматриваются средства дальнейшего преобразования спектра или дополнение недостающих четных гармоник путем «подмешивания» октавно повышенных сигналов. В этом случае имеет место одна из простейших форм гармонического (октавного) синтеза спектра.

Важную группу преобразователей спектра представляют одновибраторы и некоторые другие схемы, преобразующие спектр сигнала на его собственной частоте. Такое преобразование позволяет добиться известной оптимизации распределения энергии по гармоникам спектра с целью повышения интонационной содержательности звука или приблизить распределение энергии в спектре к распределению, характерному для тех или иных известных тембров.

БИНАРНЫЕ ТРИГГЕРНЫЕ ДЕЛИТЕЛИ ЧАСТОТЫ

На рис. 24 приведена типичная схема делителя частоты на два (транзисторы T_3 и T_4) с пусковым триггером (транзисторы T_1 и T_2). Как известно, такой так называемый бинарный триггер-делитель

представляет собой симметричный застопоренный мультивибратор, обладающий двумя устойчивыми состояниями, каждое из которых характеризуется наличием одного открытого и одного закрытого транзистора в его схеме. В симметричной схеме начальное устойчивое положение образуется в силу случайных факторов. При подаче на коллекторные нагрузки R_{10} и R_{11} кратковременного положительного пускового импульса (через диоды $Д_1$ и $Д_2$ с промежуточной потенциальной точки R_8—R_9) происходит быстрое запирание открытого транзистора и отпирание закрытого. Образовавшееся после переброса новое состояние схемы сохраняется до прихода следующего (второго) пускового импульса, который восстанавливает первоначальное состояние схемы. Таким образом, на выходе делителя

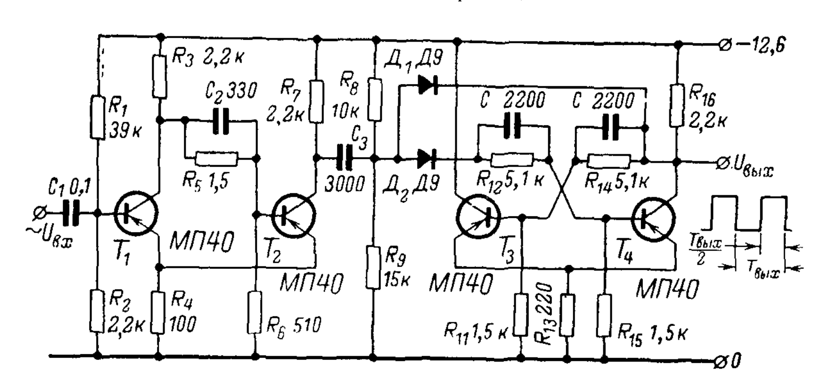


Рис. 24. Каскад бинарного делителя с пусковым триггером.

(в данной схеме — на R_{16}) попеременно образуются напряжения с устойчивыми уровнями, соответствующие режиму открытого и закрытого транзисторов, чередующиеся с частотой пусковых импульсов и, следовательно, повторяющиеся с частотой, вдвое пониженной по отношению к той же частоте пусковых импульсов. Форма переменного напряжения на выходе делителя показана на том же рис. 24.

Как ясно из изложенного, для того чтобы делитель частоты работал нормально, необходимы пусковые импульсы с крутым фронтом. Поэтому, например, синусоидальное напряжение, которое может быть получено от одного из ведущих генераторов в многоголосном ЭМИ, само по себе для приведения делителя в действие непригодно. Для преобразования переменного напряжения с плавной огибающей в напряжение с крутыми перепадами, применяется, как это было объяснено в предыдущей главе, несимметричный триггер, обладающий свойством резкого переброса вблизи определенных уровней потенциала на его входе (триггер Шмитта). Этот триггер работает на транзисторах T_1 и T_2. Напряжение с его выхода (R_7) передается на вход делителя (R_8, R_9) через разделительный дифференцирующий конденсатор C_3. По схеме и назначению он полностью соответствует приведенному на рис. 19.

Если необходимо последовательно делить частоту на 2, 4, 8 и т. д., применяется каскадное соединение делителей, схема каждого из которых соответствует приведенной на рис. 24 в пределах эле-

ментов от C_3 до R_{16} включительно. Поскольку на выходе делителя перепады напряжения характеризуются крутым фронтом, каскадирование делителей не требует применения промежуточных пусковых триггеров, и каждый последующий делитель может быть запущен выходным напряжением предыдущего. Иначе говоря, для запуска второй ступени деления на два от первого делителя коллекторный резистор R_{16} будет для второго делителя тем же, чем для первого делителя резистор R_7 в схеме пускового триггера. Очевидно, что в случае образования цепи октавных тонов требуется столько каскадов делителей, сколько октавных тонов необходимо получить без учета исходного тона. При этом образуется цепь частот, кратных делению на два, т. е. 1/1—1/2—1/4—1/8—1/16—1/32—1/64 и т. д.

Как уже было упомянуто, бинарный делитель имеет специфический, нечетный состав гармоник в спектре вырабатываемого им сигнала. Поэтому он может применяться именно с целью образования такого спектра для получения соответствующего тембра, а не с целью октавного понижения частоты. Чтобы получить данный тембр на необходимой высоте звука, приходится предусматривать октавно-повышенный диапазон задающих частот.

ДЕЛИТЕЛИ С КОЭФФИЦИЕНТАМИ ДЕЛЕНИЯ 3, 4 и 5

В некоторых схемах спектрального синтеза, о которых будет сказано ниже, применяются делители частоты с коэффициентами деления 3, 4 и 5. Деление частоты на 4, как должно быть ясно из предыдущего, достигается применением двух последовательно включенных бинарных делителей. Деление частоты на 3 и 5 достигается в схемах, базирующихся на тех же бинарных триггерах с применением дополнительных пусковых цепей, обеспечивающих соответствующий коэффициент пересчета пусковых импульсов от входа делителя к его выходу.

На рис. 25 приведена схема с коэффициентом деления частоты 3, в основе которой находятся две бинарные ячейки (T_2—T_3 и T_4—T_5). Пусковой триод T_1 может, в частности, входить в схему триггера Шмитта, аналогичную схеме на рис. 24. Помимо пусковых диодов, используемых для переброса триггеров в схеме деления на два ($Д_2$, $Д_3$, $Д_6$ и $Д_7$ на рис. 25), здесь имеются диоды $Д_1$, $Д_5$ и $Д_9$, выводящие импульсы запуска и переброса положительной полярности на эмиттерный повторитель T_6, а с последнего — на базы транзисторов T_3 и T_5. Взаимодействие пусковых импульсов, поступающих на триггеры, с одной стороны, через диоды $Д_2$, $Д_3$, $Д_6$ и $Д_7$ и, с другой стороны, через диоды $Д_4$ и $Д_8$, создает условия результирующего пересчета схемой входной частоты с коэффициентом 3.

На рис. 26 приведена схема с коэффициентом деления частоты 5. Для получения такого деления требуется уже три бинарные ячейки (T_2—T_3, T_4—T_5 и T_6—T_7), причем в связи с общим изменением схемы взаимодействия ячеек в выходной ячейке один из пусковых диодов ($Д_9$) отсоединен от обычной точки запуска (R_{21}—R_{22}) и присоединен к точке запуска первого триггера (R_3—R_4). Остальные дополнительные пусковые связи осуществляются диодами $Д_1$, $Д_4$, $Д_7$ и $Д_{10}$ и вспомогательным эмиттерным повторителем на триоде T_7.

Сопоставление рис. 24—26 показывает, что получение коэффициентов деления частоты 3 и особенно 5 приводит к значительному усложнению схем делителей.

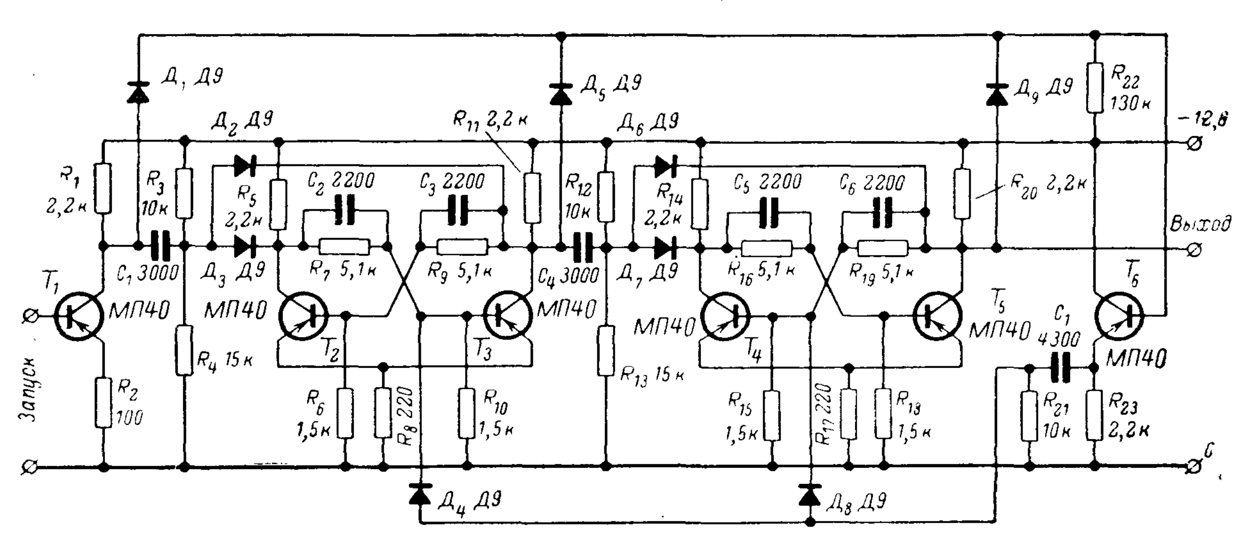


Рис. 25. Каскад делителя частоты 1/3.

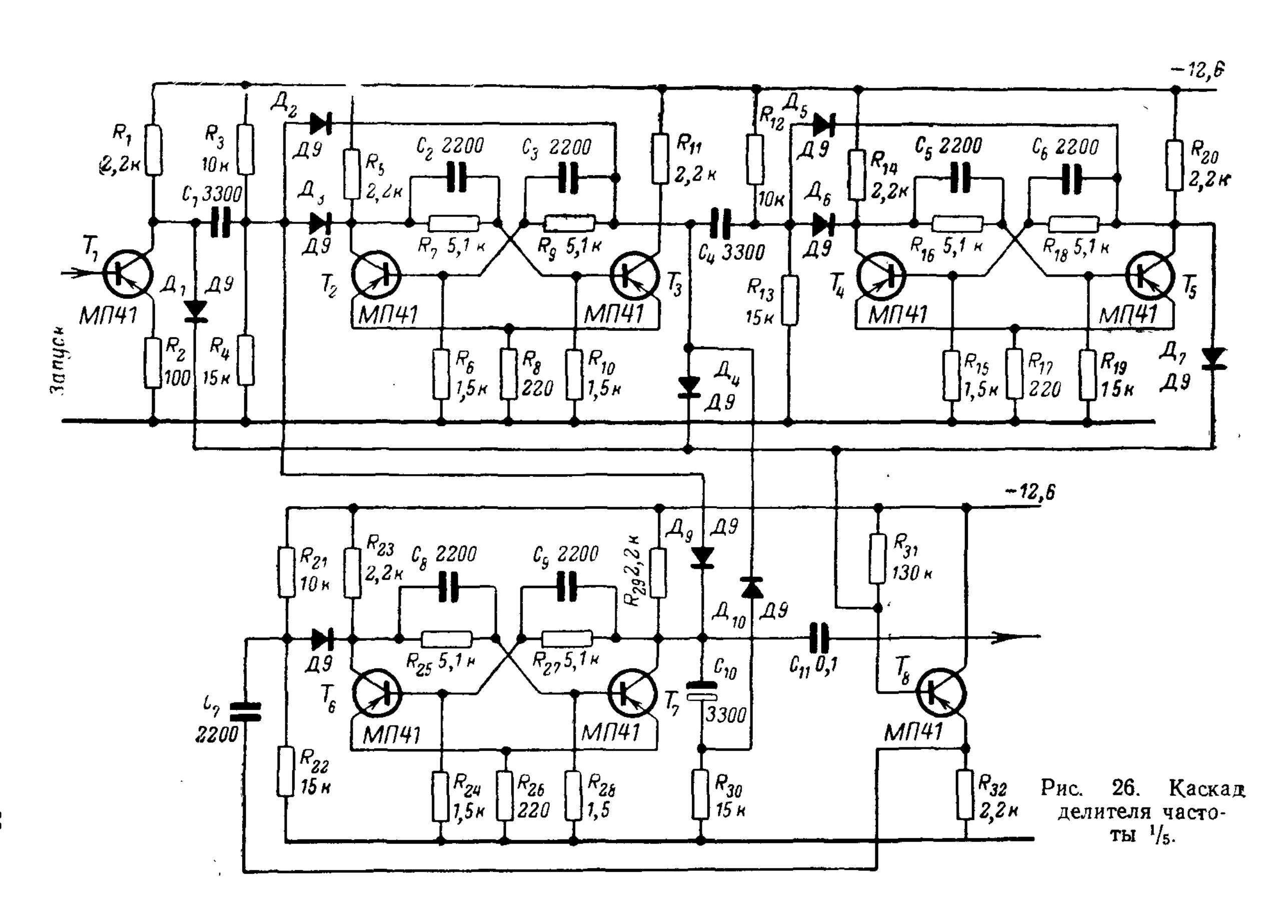


Рис. 26. Каскад делителя частоты 1/5.

ГАРМОНИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ НА БАЗЕ ДЕЛИТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ

Гармонический синтез в строгом смысле слова представляет собой процесс (или результат) образования сложного спектра из элементарных (синусоидальных) тонов, находящихся в кратных (гармонических) отношениях. Однако, очевидно, допустимо синтезировать сложный спектр не из независимых элементарных тонов, а из предварительно подготовленных групп тонов, имеющих значение частных гармонических ассоциаций синтезируемого спектра. Именно такая технология наиболее реальна для практических схем ЭМИ.

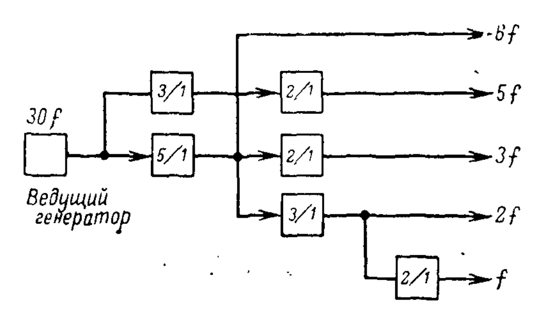


Рис. 27. Блок-схема синтеза сложного гармонического спектра.

В ЭМИ типа орга́на, содержащих октавные делители частоты в качестве датчиков тонов, октавные дополнения спектров — наиболее естественная форма гармонического синтеза, поскольку спектры самих октавных делителей лишены четных компонентов. Вместе с тем октавные дополнения меняют тембр звука в ограниченных пределах, так как при этом действует принцип октавного подобия звуков.

Значительно ярче проявляется дополнение комплексов, относящихся к третьей и пятой гармоникам. Как было показано в гл. 2, в орга́нах возникает возможность заимствовать для такого дополнения спектры звуков темперированной шкалы, находящихся к основному звуку в отношении квинты через октаву (т. е. приблизительно как 3/1) и большой терции через две октавы (приблизительно как 5/1). Неточное соответствие этих «темперированных» гармоник натуральным приводит к их более резкому выделению и, что особенно важно, придает звучанию специфичность, которая с позиций квалифицированного музыкального восприятия скорее подпадает под определение «эффекта», чем под понятие тембра в лучшем смысле этого слова.

На рис. 27 показана блок-схема для сложного гармонического синтеза, в основу которого положен принцип соединения строго кратных спектров. Практически такая схема может быть осуществлена в одноголосных ЭМИ и, строго говоря, именно в таких инструментах имеется действительная необходимость добиваться в необходимых случаях особенных тембров, способствующих яркому выделению мелодического голоса в общем звучании. Соединение же таких тембров в аккордах не способствует правильному восприятию их акустической конструкции.

В схеме рис. 27 от ведущего генератора осуществляется запуск ряда делителей частоты с различными коэффициентами. Коэффициенты деления частоты обозначены на рисунке. На выходе схемы образуются спектры, относящиеся к звукам с частотой основных тонов *f*, 2*f*, 3*f*, 5*f* и 6*f*. Соединение этих спектров в различных дозах приводит к образованию сложного спектра на частоте *f* с преобладанием консонантных гармоник, имеющих интервальные коэффициенты по отношению к гармоникам основного спектра 2/1, 3/1, 5/1, 6/1. Очевидно, что высота звука такого составного спектра будет определяться нижайшей частотой (*f*), по отношению к которой ведущий генератор должен иметь частоту 30*f*.

В ряду кратных гармонических компонентов в данной схеме отсутствует компонент с коэффициентом 4/1. Чтобы ввести такой компонент было бы необходимо частоту ведущего генератора поднять до 60*f*, что вызвало бы существенные дополнительные трудности. Действительно, в приведенном на рис. 27 варианте схемы для обеспечения звучания в диапазоне, например, от *до* малой октавы до *ми* третьей октавы (132—1 320 *гц*) диапазон ведущего генератора должен быть от 3 960 до 39 600 *гц* при импульсной форме выходного напряжения. Такой режим работы генератора требует уже известных усложнений его схемы и конструкции элементов, а при дальнейшем увеличении верхней границы по частоте таких усложнений будет еще больше. Вместе с тем из-за многократного повторения октавных призвуков в спектрах частоты *f* и 2*f* двухоктавный компонент спектра (4*f*) в сложных комбинациях, включающих компоненты 3*f* и 5*f*, особенной ценности не представляет.

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СПЕКТРА НА ЧАСТОТЕ СИГНАЛА

Сложные схемы гармонического синтеза необходимы только в случае формирования особо характерных тембров. Для получения спектров обычного музыкального значения широкие возможности дают относительно простые схемы преобразования спектра на частоте сигнала.

Важнейший класс преобразователей такого рода образуют одновибраторы, создающие прямоугольные импульсы, длительность которых можно изменять в значительных пределах в масштабе периода запуска. Для характеристики формы таких колебаний часто применяют понятие «меандр» (в сущности, весьма мало подходящее в данном случае).

На рис. 28 приведены спектрограммы колебаний такого вида для нескольких частных значений длительности импульсов по отношению к периоду повторения колебания *T*. Характерная особенность, отличающая спектры этих колебаний, состоит в том, что определенные гармоники периодически выпадают, а напряженность (интенсивность гармоник) спектра по мере уменьшения длительности импульса увеличивается.

В случае, который относится также и к симметричному триггеру-делителю, когда импульс занимает 1/2 периода (рис. 28,*а*), выпадают 2-я и кратные ей гармоники; в случае, когда импульс занимает 1/4 периода (рис. 28,*б*), выпадают 4-я и кратные ей гармоники.

Для обычной схемы одновибратора характерна устойчивость колебательного цикла, формирующего меандр. Поэтому при изменении

частоты пусковых импульсов отношение длительности импульса, вырабатываемого одновибратором, к периоду повторения будет меняться. В этом отношении имеется существенное различие между одновибратором и бинарным делителем частоты: если в одновибраторе форма колебаний и спектр с соотношением $\tau=0{,}5T$ (см. рис. 28,*в*) соответствуют только какой-либо одной определенной частоте, то в бинарном делителе форма колебаний и связанный с ней состав спектра сохраняются в широком диапазоне.

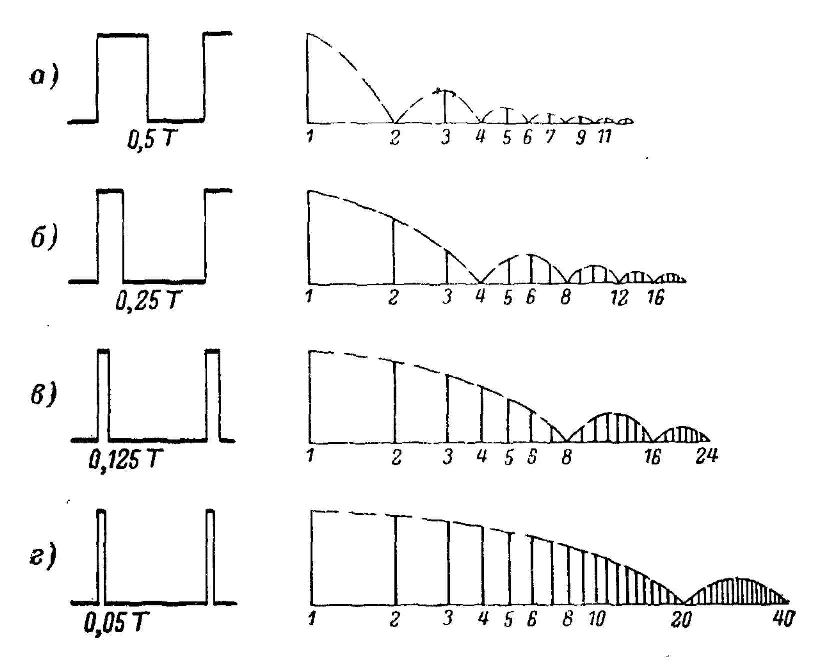


Рис. 28. Спектрограммы прямоугольно-импульсных колебаний.

В общем случае нельзя сказать, что сохранение спектрального состава в широком диапазоне представляет собой необходимое условие формирования тембра. Однако в отдельных случаях такая устойчивость спектральной характеристики составляет основу тембрового признака. В частности, симметричное деление периода колебаний, приводящее к выпадению четных гармоник, лежит в основе кларнетного тембра. Поэтому тембры такого рода образуют в ЭМИ с помощью бинарных делителей, а не одновибраторов. Напротив, для формирования тембра некоторых других духовых инструментов наиболее подходящим может оказаться одновибратор в режиме коротких импульсов с длительностью порядка 0,1 *T*. Спектр колебаний с такими короткими импульсами не содержит провалов в зоне гармоник низких номеров и по своему характеру приближается к спектру, свойственному колебаниям с одним крутым фронтом внутри периода, показанным на рис. 29.

К такой форме колебаний можно значительно приблизить сигнал делителя частоты и одновибратора с широким импульсом при необходимости сглаживания спектра (в случае бинарного делителя — чтобы устранить «кларнетность» тембра). Для этого подходит схема, показанная на рис. 30. Здесь напряжение прямоугольной формы с выхода эмиттерного повторителя $T_1(R_1)$ после прохождения через дифференцирующую ячейку C_1R_2 подается на нагрузку R_3 через диод $Д_1$. В результате отсечки диодом полуволны дифференцированного колебания остается гладкая волна, соответствующая приведенной на рис. 29,*в* или *г*.

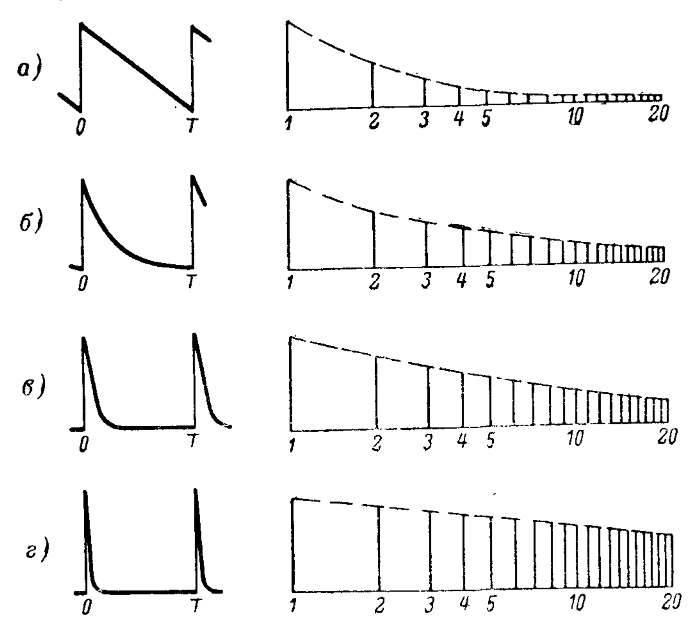


Рис. 29. Спектрограммы волн с единственным крутым переходом внутри периода.

Следует более подробно остановиться на схеме режима формирования прямоугольно-импульсных колебаний с отношением длительности импульса к периоду повторения, характерному для тембров струнного характера, как ввиду особой выразительности таких звуков, так и ввиду их исключительной общей музыкальной ценности.

По данным автора, отношение длительности импульса к периоду повторения (τ/T) имеет довольно четко выраженное оптимальное значение, при котором тембр звука ближе всего подходит к звучанию струнных инструментов (главным образом, виолончели и скрипки), и имеет наиболее высокое интонационное качество. На рис. 31 кривая *1* представляет такую оптимальную зависимость отношения τ/T от высоты и частоты звука, а кривые *2—2* показывают границы, в которых еще сохраняется приближение тембра к оптимальному.

Кривая *3* выражает зависимость абсолютного оптимального значения τ от высоты (и частоты) звука. Кривые рис. 31 позволяют объективио установить требования к параметрам импульса или к режиму генератора импульсов на каждой частоте звукового диапазона для получения соответствующего тембрового эффекта. Абсолютное значение τ удобно использовать при расчете параметров мультивибратора (или одновибратора), а относительная величиина τ/T представляется удобной для контрольных измерений при регулировке схемы, когда значения τ и T могут быть измерены на экране осциллографа в миллиметрах. Уместно отметить, что геометрические параметры прямоугольно-импульсных колебаний вообще очень просты и удобны для контроля, а следовательно, для воспроизведения.

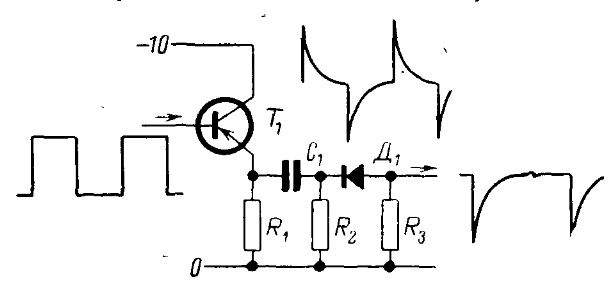


Рис. 30. Схема преобразования прямоугольных колебаний в волны с единственным крутым перепадом.

В многоголосных ЭМИ, чтобы обеспечить оптимальный состав спектра в соответствии с рис. 31, очевидно, требуется ввести индивидуальные одновибраторы с соответствующими оптимальными параметрами для каждого тона клавиатуры. Если считать, что в составе каждого тона при этом должен быть и бинарный делитель, то такое усложнение схемы приведет, грубо говоря, к удвоению числа составляющих ее элементов. Невольно напрашивается другое решение, при котором датчики спектра из одновибраторного режима будут переведены в режим мультивибраторов с кратной синхронизацией от вышележащих одноименных тонов, обеспечивающей получение точных октавных соотношений (т. е. в режиме деления частоты на 2). При этом, разумеется, придется позаботиться о надлежащих условиях для обеспечения зон устойчивой синхронизации и о введении средств частотной подстройки мультивибраторов, обеспечивающих вхождение в зону захвата с октавным коэффициентом.

В мелодических ЭМИ, очевидно, требуется создать режим оптимального спектра на единственном одновибраторе, который в обычном виде не отвечает требованиям формирования такого спектра в широком диапазоне частот. Зависимость τ/T для обычного одновибратора, находящегося в режиме, соответствующем оптимальной характеристике по низшей частоте, представлена на рис. 31 кривой *4*. Как видно из рисунка, эта зависимость совпадает с оптимальной только в области низких звуков. Для высоких звуков τ оказывается больше оптимального, поскольку с увеличением частоты возбуждения одновибратора не происходит соответствующего суживания импульсов, длительность которых определяется неизменными параметрами его схемы.

На рис. 32 приведена схема одновибратора с управляемым режимом, обеспечивающая формирование ширины импульса по оптимальной кривой, приведенной на рис. 31 (кривая *1*). Здесь на базу пускового транзистора T_1 подается напряжение прямоугольной формы (от делителя частоты). Через конденсаторы C_1 и C_2 дифферен-

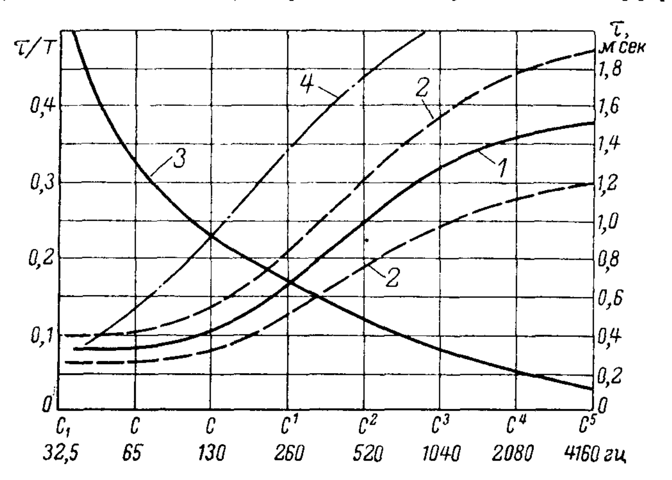


Рис. 31. Связь длительности прямоугольных импульсов с частотой следования в музыкальном диапазоне.

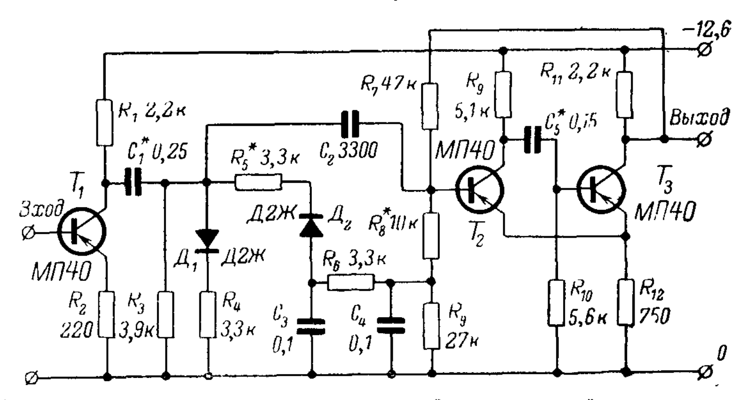


Рис. 32. Одновибратор с автоматической регулировкой длительности импульса по частоте следования.

цированные импульсы подаются на базу транзистора T_2, входящего в схему одновибратора T_2—T_3, и осуществляют его запуск в начале каждого периода входного напряжения. От пускового каскада T_1 напряжение поступает также в цепь частотного детектора $Д_1$—$Д_2$, создавая заряд на конденсаторе C_1, потенциал которого зависит от частоты заряжающих импульсов. Напряжение, возникающее на C_3,

через фильтр R_6C_4 поступает на нагрузку R_9 и в цепь базы T_2. На низших частотах это напряжение смещения мало, так что одновибратор вырабатывает импульсы с шириной, определяющейся элементами его схемы (начальная ширина импульса устанавливается путем подбора конденсатора C_5). С повышением частоты напряжения смещения на базе T_2 по цепи $Д_2$ возрастает и импульс одновибратора суживается. Регулировкой величин C_1, R_5 и R_8 можно добиться такой зависимости напряжения смещения на базе T_2 от частоты сигна-

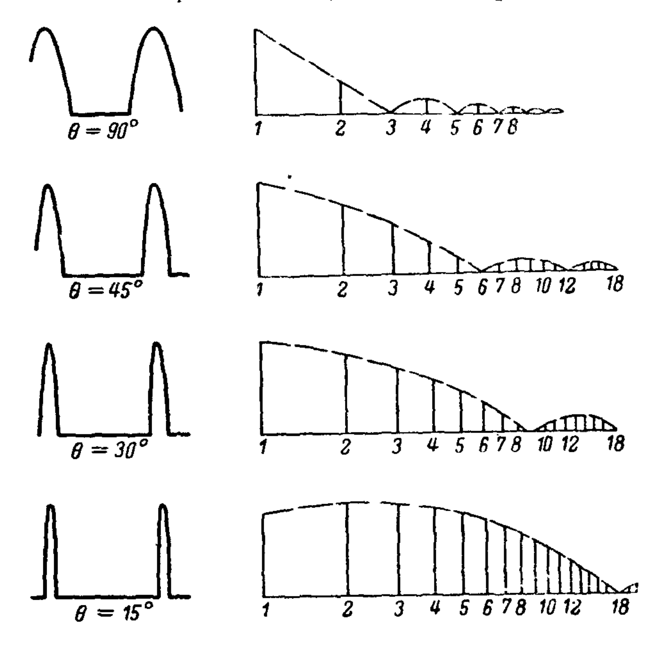


Рис. 33. Спектры усеченного синусоидального колебания.

ла на входе схемы, при которой зависимость ширины импульса на выходе от частоты наиболее приближается к кривой *1* рис. 31.

В зависимости от конкретных условий задачи схемы формирования спектра могут существенно различаться. Например, для генераторов с синусоидальной формой напряжения формирование музыкально-содержательного спектра может быть обеспечено простой схемой односторонней отсечки колебаний[1]. Результат обогащения спектра в этом случае для нескольких частных режимов отсечки иллюстрируется рис. 33. Приведенные спектрограммы показывают, что для получения достаточной энергии спектра в области интонационно важных гармоник необходимо обеспечить глубокую отсечку синусоид, характеризующуюся углом отсечки в пределах 15—30°.

[1] Такой вариант спектрального преобразования представляет практический интерес для ЭМИ с генерированием звуковых колебаний в схеме высокочастотных биений (например, для «Терменвокса»).

В ряде случаев, особенно относящихся к многоголосным инструментам, помимо схем основного формирования важное значение могут иметь относительно простые схемы коррекции спектра, которые позволяют добиться более точного соответствия его требованиям

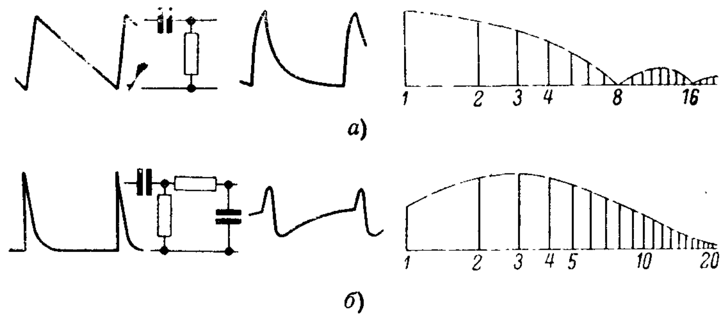


Рис. 34. Простые схемы коррекции спектра.

интонационной содержательности или яркости. Две такие схемы коррекции показаны на рис. 34. Действие их в основном понятно из приведенных там же форм колебаиий (на входе и выходе схем) и спектрограмм выходного сигнала. В случае *а* применена простая

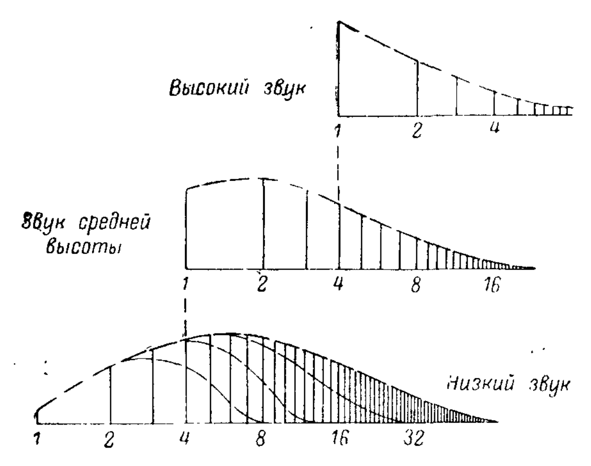


Рис. 35. Зависимость оптимальной структуры спектра от высоты звука (по регистрам).

дифференцирующая ячейка, обеспечивающая снижеиие энергии нижайших гармоиик, т. е. относительное увеличеиие эиергии более высоких гармоник. В случае *б* дифференцирующая ячейка дополиена иитегрирующей с постоянной времени, примерно на порядок меиьшей, чем у дифференцирующей. При этом достигается преобладание

основных гармоник интонационной зоны. Эти схемы по существу своего действия относятся к простейшим частотным фильтрам.

Данные ячеек, приведенных на рис. 34, должны выбираться в зависимости от конкретных задач коррекции, но при всех условиях необходимо учитывать высотное положение звука. Как было показано в гл. 1, для высоких звуков в структуре спектра решающее значение имеет первая гармоника, в среднем регистре должно быть обеспечено выделение интонационной зоны спектра, а в низком регистре имеются условия для применения спектров как большой, так и малой протяженности, но почти всегда без существенного выделения первой гармоники. Такая схема спектральных структур в первом приближении иллюстрируется рис. 35.

ПРОБЛЕМА ПОЛУЧЕНИЯ НЕГАРМОНИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ

Выше были рассмотрены различные системы гармонического преобразования периодических колебаний. Как было показано в гл. 1, для некоторых характерных звучаний существенный интерес представляет получение не полностью гармонических спектров, которые могут производить достаточно четкое высотное впечатление при известном нарушении статичности колебательного цикла. В качестве практически ценного примера подобного рода был приведен спектр звуков фортепиано.

Известные системы получения негармонических спектров основываются на довольно сложном преобразовании спектра гармонического, при котором все гармоники сдвигаются относительно своего начального положения на некоторую разность Δf, одинаковую для всех гармоник. При таком разностном сдвиге наибольший относительный интервал сдвига ($\Delta f/f$) образуется у нижайших гармоник и падает по мере увеличения номера гармоник. В этом случае нарушение интонационных качеств звука проявляется быстрее, чем изменение структуры тембра, в то время как у некоторых естественных источников не полностью гармонических колебаний нижайшие обертоны практически гармоничны, а прогрессивный «разгон» по частоте наблюдается по мере повышения номера обертона. В этом последнем случае тембровая характерность проявляется раньше, чем нарушается интонационное содержание звука и, таким образом, данная структура представляется в музыкальном отношении более предпочтительной.

По-видимому, для формирования музыкально ценных спектров не вполне гармонической структуры перспективны системы, в которых датчики тона одновременно являются и датчиками спектра со всеми деталями, относящимися к положению обертонов в спектре. К сожалению, чисто электронные системы такого рода пока не разработаны.

Поскольку получение не полностью гармонических спектров в системах с электронным звукообразованием весьма проблематично, имеется основание отметить специфические возможности электрифицированных, или так называемых адаптизированных музыкальных инструментов, т. е. инструментов с электрическим усилением колебаний механических вибраторов. Из таких инструментов наиболее распространены различного рода электрогитары. Однако в связи с рассматриваемым вопросом здесь следует упомянуть главным образом инструменты со стержневыми и пластинчатыми вибраторами.

К инструментам такого рода относятся различные «электроколокола», среди которых выделяются высоким качеством инструменты фирмы Шульмерих Карилонс (США). Из отечественных работ в данной области можно указать на электроколокола Института звукозаписи (Москва).

В таких инструментах в зависимости от конфигурации вибраторов может быть достигнута весьма различная степень негармоничности обертонов. При этом конструкция инструмента получается в целом несложной.

Таким образом, в области звучаний с не полностью гармоническими обертонами электрифицированные инструменты могут представить еще на длительный период времени экономически и конструктивно обоснованный компромисс между классической и электронной музыкальной техникой.

Глава пятая

АМПЛИТУДНЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ И МОДУЛЯТОРЫ

Большое значение в схемах ЭМИ имеют различные устройства для формирования амплитудной огибающей звука и управления его громкостью. Это в основном следующие устройства:

ножные регуляторы уровня сигнала;

амплитудные модуляторы уровня сигнала, действующие от специального источника управляющего напряжения;

датчики управляющего напряжения для модуляторов, в том числе со схемами автоматического временнóго формирования амплитудной огибающей и с устройствами преобразования нажимных или ударных усилий пальцев исполнителя.

НОЖНЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ УРОВНЯ СИГНАЛА

Наиболее распространен в настоящее время и, очевидно, будет необходим для ЭМИ и в будущем регулятор громкости с приводом от педали или коленного рычага, осуществляющий исполнительский контроль уровня сигнала: в целом — для многоголосных ЭМИ и для единственного звука (или ограниченного количества звуков) — в мелодических ЭМИ.

Регулятор в ЭМИ имеет ряд отличий от подобных регуляторов в звуковых трактах радиоприемников, магнитофонов и другой бытовой аппаратуры. Основные отличия определяются следующими требованиями:

регулировка должна обеспечиваться в широком диапазоне (не менее 50 *дб*) без скачков в начальном, промежуточном и конечном уровнях;

в процессе действия не должно прослушиваться шорохов, тресков и других эффектов, связанных с неустойчивыми контактами, особенно заметных при изменении громкости тянущихся звуков (в процессе звучания);

в связи с непрерывным употреблением в процессе исполнения музыки, в частности в режимах быстрого и переменного по знаку

изменения уровня громкости, регуляторы должны иметь высокую износоустойчивость.

Поскольку обычные непроволочные потенциометры отличает наличие начального и промежуточных скачков сопротивления[1] и низкая износоустойчивость, они оказываются малопригодными для педальных регуляторов ЭМИ. Обычно частичный износ токопроводящего слоя такого потенциометра относительно быстро приводит к возникновению шорохов, а позже — тресков при действии регулятора, которые можно устранить, только заменив сработавшийся потенциометр новым. Поэтому применять обычные непроволочные потенциометры можно только в крайнем случае и то, если конструктивное исполнение регулирующего механизма позволит осуществлять смену потенциометра в условиях эксплуатации неквалифицированным персоналом, без применения специальных инструментов и без необходимости регулировки привода после смены потенциометра.

Что касается проволочных потенциометров, то их применение встречает практически еще большие трудности, так как при переходе ползунка с витка на виток (даже при очень хорошем исполнении ползунка и контактной поверхности) слышатся шорохи и треск, а поскольку для плавной регулировки обмотку приходится делать достаточно тонкой, она в режиме непрерывного регулирования, имеющего место в ЭМИ, оказывается непрочной.

Особенно высокие требования к плавности и диапазону регулировки предъявляются в мелодических ЭМИ, где внимание слушателей может концентрироваться на одном главном голосе, а по типичным условиям исполнения мелодии часто требуется свести звук «на нет» в плавном «дименуэндо». Для таких регуляторов в случае исключительной необходимости использовать обычные непроволочные потенциометры можно рекомендовать каскадное включение двух потенциометров (или сдвоенного потенциометра), при котором сигнал с ползунка первого потенциометра подается на начало второго потенциометра, а с ползунка последнего — уже в последующий тракт ЭМИ. Для получения оптимальной зависимости громкости от угла поворота в этом случае рекомендуется использовать один потенциометр логарифмического, а другой — линейного типа в любой последовательности включения. Сопротивлеиие второго потенциометра с целью устранения взаимных влияний должно быть в 3—5 раз выше первого. Предпочтение, особенно в случае сдваивания, следует отдавать потенциометрам с легким ходом, но без люфта и качания оси.

В связи с требованием высокой износоустойчивости для применения в ЭМИ представляют значительный интерес различные системы бесконтактных регуляторов громкости, которые обычно имеют высокую износоустойчивость и обеспечивают весьма плавную регулировку. Повышенная сложность таких регуляторов окупается не только их высокими электрическими качествами, но и долговечностью.

Одна из форм бесконтактного регулятора показана на рис. 36. Здесь аттенюатор состоит из двух фоторезисторов, находящихся в светоэкранирующей камере, одновременно являющейся и электрическим экраном регулятора. Засветка фоторезисторов осуществляется от источника $Л_1$ и притом так, что когда фоторезистор R_1 осве-

---

[1] Скачок сопротивления в зоне максимальной громкости может быть устранен применением предупредительного упора.

щён, фоторезистор R_2 затемнен подвижным светоэкраном *Э*, что соответствует наименьшему уровню сигнала на выходе регулятора. В другом предельном случае затемнен фоторезистор R_1, а R_2 находится в режиме наибольшей освещенности.

Соответствующим подбором взаимного расположения фоторезисторов, источника света и формы фотоэкрана может быть обеспечена необходимая зависимость выходного уровня сигнала от угла поворота этого экрана и, следовательно, от угла поворота педального привода или коленного рычага. Отношение максимального уровня сигнала к минимальному на выходе регулятора данного типа определяется отношением величины темнового сопротивления фоторезистора к его сопротивлению в режиме полной освещенности. Для наиболее чувствительных сернисто-кадмиевых элементов (типа ФСК-1) достигается диапазон регулирования 1 : 100, или 40 *дб*, который для данных целей не может быть признан вполне достаточным.

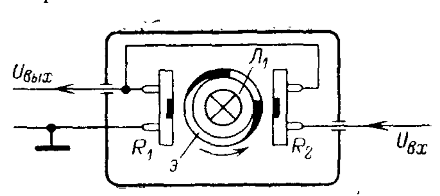


Рис. 36. Регулятор уровня сигнала с фоторезисторами.

Диапазон регулировки сокращается еще на 6 *дб* в случае упрощенной схемы, в которой фоторезистор R_1 заменяется обыкновенным резистором, величина сопротивления которого соответствует сопротивлению фоторезистора R_2 в режиме наибольшей освещенности.

Чтобы увеличить диапазон регулирования сигнала, нужно каскадно включить фоторезисторные потенциометры по принципу, изложенному выше для обычных потенциометров. Это не исключает использования общего источника засветки для всей системы.

Фотоэлектрический регулятор уровня сигнала помимо упомянутого недостатка (малый диапазон регулирования в случае применения простой схемы) имеет, к сожалению, и другие недостатки:

1) реакция фоторезистора на изменение освещенности замедлена;

2) на выходе в случае питания источника света переменным током возникает фон даже в случае применения лампы накаливания с толстой нитью. Источник света недолговечен, он может мгновенно выйти из строя (перегорает);

3) величина рабочих сопротивлений потенциометра имеет высокий порядок.

Из перечисленных дефектов наиболее серьезен первый, поскольку инерционность регулировки громкости значительно снижает выразительность исполнения музыки и дезориентирует исполнителя. В упомянутых фоторезисторах ФСК-1 постоянная времени установления нового уровня сопротивления при скачке освещенности составляет 0,05 *сек*. Это примерно в 5—10 раз больше, чем можно допустить для гибкой выразительной динамической линии исполнения.

Менее инерционные фоторезисторы сернисто-свинцового типа имеют настолько малый диапазон изменения сопротивления под действием света (около 20%), что их применение практически исключается даже в каскадной схеме.

Таким образом, описанный регулятор следует рассматривать скорее как пример специфических трудностей решения, а не как пример самого решения в практическом смысле.

Несложен по устройству и хорошо действует регулятор громкости, конструктивная схема которого показана на рис. 37.

Регулятор состоит из сосуда *1*, наполненного резистивной жидкостью, например раствором сернокислого никеля ($NiSO_4$) в воде, с концентрацией, необходимой для получения соответствующей величины сопротивления. В жидкости находится три электрода: неподвижный, подающий напряжение электрод *2* с изоляцией *3* на вводе, неподвижный электрод *4* нулевого потенциала и подвижный электрод — зонд («ползунок») *5* с приводом от оси *6* и пружинным соединением *7* с внешней цепью. Так же как и подающий электрод *2*, зонд обязательно должен иметь изоляцию *8* на поводке, исключающую взаимодействие его с остальными электродами вне рабочей зоны, образованной внутренними поверхностями электрода *4* и рабочим выступом электрода *2*; в эту зону электрод *5* входит своим горизонтально отогнутым концом (на рисунке не виден). Регулятор включается в тракт ЭМИ по потенциометрической схеме. Благодаря специальной форме электрода *4* и его расположению относительно электрода *2* электрическое поле в рабочей зоне в направлении от электрода *2* к заглушенному концу вилки электрода *4* убывает по закону, близкому к логарифмическому, и тем самым обеспечивается весьма плавное регулирование амплитуды сигнала в диапазоне по крайней мере 60 *дб*, но, как правило, до 80 *дб*.

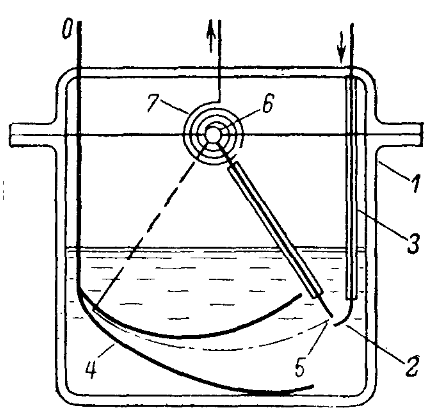


Рис. 37. Регулятор уровня сигнала с резистивной жидкостью.

Правда, этот регулятор имеет один, но существенный недостаток: наличие в нем жидкости вызывает необходимость устройства водонепроницаемой оболочки с выводом оси привода через сальник и обеспечения определенного рабочего положения регулятора. Во избежание химического разрушения все внутренние металлические элементы конструкции должны быть изготовлены (в случае использования в качестве электролита $NiSO_4$) из никеля, а изоляционные части и корпус — из материалов, стойких к воздействию электролита.

Необходимо напомнить, что амплитудное регулирование не исчерпывает понятия изменения громкости музыкального звука. Как правило, более громкий музыкальный звук одновременно и более «яркий», т. е. более напряженный по своему спектру. Детали связи громкости и яркости звука создают специфическую характеристику звучания того или иного инструмента. В первом общем приближении можно считать, что при изменении интенсивности звука в зоне наиболее слышимых частот (т. е. от 1 000 до 3 500 *гц*) на 60 *дб*

изменение интенсивности низших частот должно быть не более 40 *дб*, считая от уровня наибольшей громкости. Такую регулировку громкости (если не считать широко известных потенциометрических регуляторов с промежуточным отводом для подключения емкости, шунтирующей высокие частоты на малых уровнях громкости) можно получить с помощью двух- или, вообще говоря, многоканальной схемы параллельного регулирования громкости, причем каждый канал должен содержать регулятор со своей индивидуальной характеристикой выходного уровня в зависимости от угла поворота и соответствующий частотный фильтр.

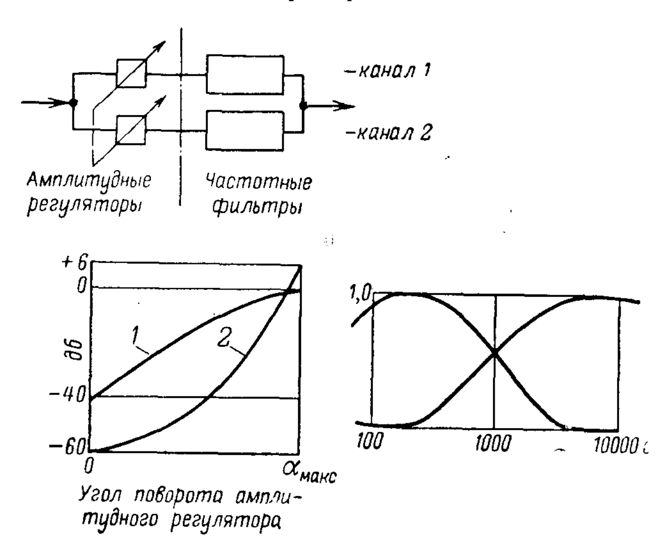


Рис. 38. Схема двухканального регулятора уровня сигнала и ее характеристики.

На рис. 38 для примера показана система двухканального регулирования и ее характеристики. Канал *1* имеет амплитудную характеристику с понижающейся крутизной нарастаиия уровия громкости в зависимости от угла поворота регулятора, а частотную характеристику с наибольшим усилением в области низших частот. Канал *2* имеет амплитудную характеристику с прогрессивно возрастающей крутизной уровня громкости и частотную характеристику, отличающуюся наибольшим усилеиием высших частот звукового диапазона. В результате, если совместно и одновременно вращать регуляторы обоих каналов, на малых уровнях громкости будет преобладать низкочастотная характеристика канала *1*, а по мере повышения громкости нехватка высоких частот будет восполияться вследствие возрастающей роли канала *2*. При соответствующей начальной установке усиления каналов можно обеспечить на повышеиных уровнях громкости преобладаине частотной характеристики канала *2* и, таким образом, контрастное увеличеиие остроты тембра с увеличением громкости.

Необходимо отметить, что в ЭМИ значение вариации тембра при изменении громкости несравненно выше, чем в радиоприемниках, усилителях записи и других системах звуковоспроизведения. Это легко понять, если учесть, что при обычном звуковоспроизведении изменение громкости без тембровой компенсации приводит только к частичному нарушению впечатления естественности звучания за счет несоответствия фактического уровня громкости предполагаемому уровню для инструментов с уже существующей зависимостью тембра от громкости. В то же время, если изменение громкости в ЭМИ не сопровождается характерным изменением тембра, нарушается сам принцип увеличения напряженности и яркости звука с увеличением громкости. Поэтому частотно-зависимое регулирование громкости в ЭМИ следует отнести к обязательным условиям сколько-нибудь выразительного исполнения.

АМПЛИТУДНЫЕ МОДУЛЯТОРЫ ЗВУКОВОГО СИГНАЛА

В радиотехнических устройствах широко применяются модуляторы для наложения огибающей звуковой частоты на колебания высокой частоты. Модуляторы, применяемые в ЭМИ, принципиально отличаются от обычных тем, что в них осуществляется наложение относительно медленно меняющегося напряжения постоянного тока на напряжение звуковой частоты. Однако и в том и в другом случаях типична схема модулятора в виде усилительного каскада с двойным управлением, так что уровень одного сигнала на выходе зависит от уровня другого сигнала на соответствующем входе.

На выходе высокочастотных моуляторов обычно содержится контур, который отделяет модулированный сигнал от модулирующей составляющей выходного тока. В низкочастотном модуляторе ЭМИ на выходе включается апериодическая в звуковом диапазоне нагрузка, отфильтровывающая только достаточно медленные изменения модулирующей составляющей. Более быстрые изменения модулирующего напряжения, возникающие, например, в начальной фазе звука, могут выделяться на нагрузке вместе со звуковой частотой и вызывать в конечном итоге помехи типа щелчков, даже более громких, чем щелчки, образующиеся при жестком включении сигнала в цепи без постоянной составляющей. Поэтому для модуляторов ЭМИ принципиально непригодны однотактные каскады в режиме малосигнального усиления, когда значение постоянной составляющей на выходе превышает амплитудное значение звуковой частоты или близко к нему.

Для низкочастотных модуляторов ЭМИ понятие коэффициента модуляции заменяется понятием непосредственного изменения амплитуды на выходе в зависимости от управляющего напряжения. Для модуляторов, действующих в тракте ЭМИ с дополнительным регулятором уровня громкости данного сигнала (т. е. в трактах мелодических ЭМИ) изменение амплитуды должно обеспечиваться в пределах не менее 60 *дб* (т. е. в 1 000 раз). Для модуляторов, действующих в независимых параллельных трактах (т. е. в многоголосных ЭМИ), во избежание звенящего фона паузы (суммы остаточных сигналов всех тонов) вариация амплитуды должна достигать 80 *дб* (т. е. в 10 000 раз).

Наибольшие трудности представляет модуляция амплитуды звукового сигнала произвольной сложной формы. Для этой цели с уче-

том требований к диапазону изменеиия амплитуды и требоваиий к компенсации составляющей модулирующего (управляющего) напряжения на выходе оказываются пригодными в основном двухтактные схемы на пентодах с управлением по первым и третьим сеткам. Схема такого модулятора показана на рис. 39.

Здесь образующие модулятор пентоды $Л_1$ и $Л_2$ по отношению к напряжению звуковой частоты поставлены в двухтактный режим, который обеспечивается применеиием иа входе модулятора фазо-

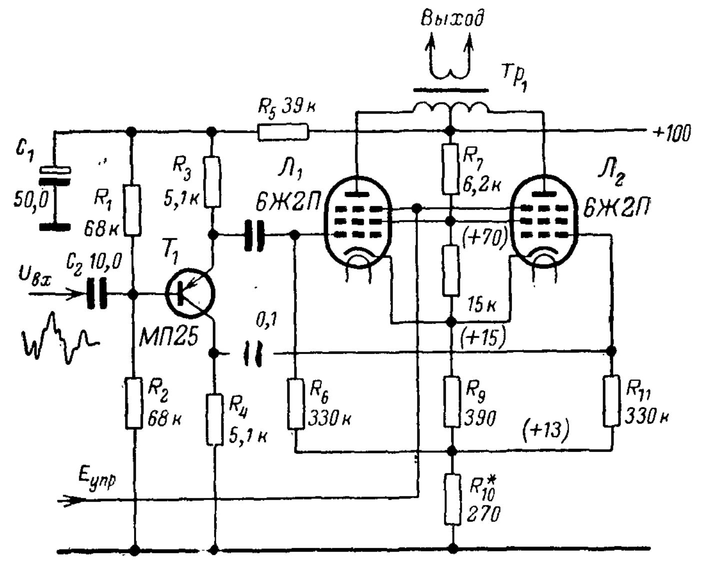


Рис. 39. Амплитудный модулятор для сигнала произвольной формы.

инвертора на транзисторе T_1. В то же время модулирующее напряженне действует на соответствующих сетках в общем направлеиии и, таким образом, не проявляется в выходной цепи, поскольку, как и в классической пушпульной схеме, напряжение звуковой частоты от обоих пентодов суммируется в симметричиом выходном трансформаторе, а токи включеиия и выключения взаимно уничтожаются.

Симметричиый модулятор не только дает возможность компенсировать модулирующий компонент на выходе, он позволяет также применить для усилеиия звукового сигнала режим класса В или АВ, что существенно повышает эффективность использования каскада по напряжению и снижает относительный уровень постоянной составляющей в каждом из плеч. Последнее обстоятельство очеиь существенно, поскольку качество компеисации модулирующего компонента на выходе определяется не только точностью симметрии плеч, но и соотиошением вычитающих и суммирующихся компонентов.

Описанная схема имеет однн, главный иедостаток: необходимость применения вакуумных ламп. Его нельзя устранить, применяя

вместо пентодов транзисторы, во всяком случае в режиме высокого уровня действующего напряжения сигнала. В этом режиме изменение управляющего напряжения (которое было бы необходимо подавать на базы транзисторов вместе с напряжением сигнала) вызывало бы не столько модуляцию уровня сигнала на выходе, сколько его прогрессирующую отсечку. Таким образом, форма напряжения на выходе модулятора при различных его уровнях была бы различной.

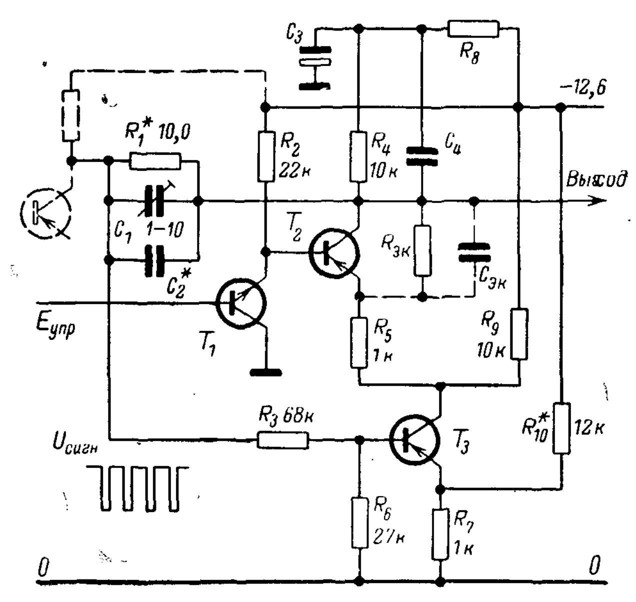


Рис. 40. Амплитудный модулятор для плоско-импульсных колебаний.

Значительно проще требуемые характеристики модулятора обеспечиваются в частном, но практически очень важном и часто единственно необходимом случае управления амплитудой прямоугольных (плоско-импульсных) колебаний. При этом особенно хорошие результаты получаются для колебаний с большой асимметрией, которые, собственно говоря, и характеризуют основные практические формы колебаний с интонационно содержательным спектром.

Схема модулятора для плоско-импульсных колебаний приведена на рис. 40. Модулятор состоит из двух транзисторов T_2 и T_3, последовательно соединенных по цепи звукового сигнала. Импульсное напряжение звуковой частоты подается на базу T_3, действующего в ключевом режиме и воспроизводящего это напряжение на промежуточной нагрузке R_9, которая служит источником коллекторного напряжения для T_2. На базу T_2 подается управляющее напряжение, регулирующее его коллекторный ток и, таким образом, задающее уровень импульсного сигнала на выходной нагрузке R_4. Чтобы повысить входное сопротивление модулятора по управляю-

щему напряжению, последнее подается на базу T_2 через эмиттерный повторитель T_1. В паузе звучания напряжение на базе T_2 должно соответствовать режиму, близкому к полному запиранию этого транзистора. Другое граничное напряжение базы должно соответствовать режиму насыщения, когда напряжение импульсов на R_9 за вычетом наименьшего падения на электродах база — эмиттер T_2 передается на выходную нагрузку R_4.

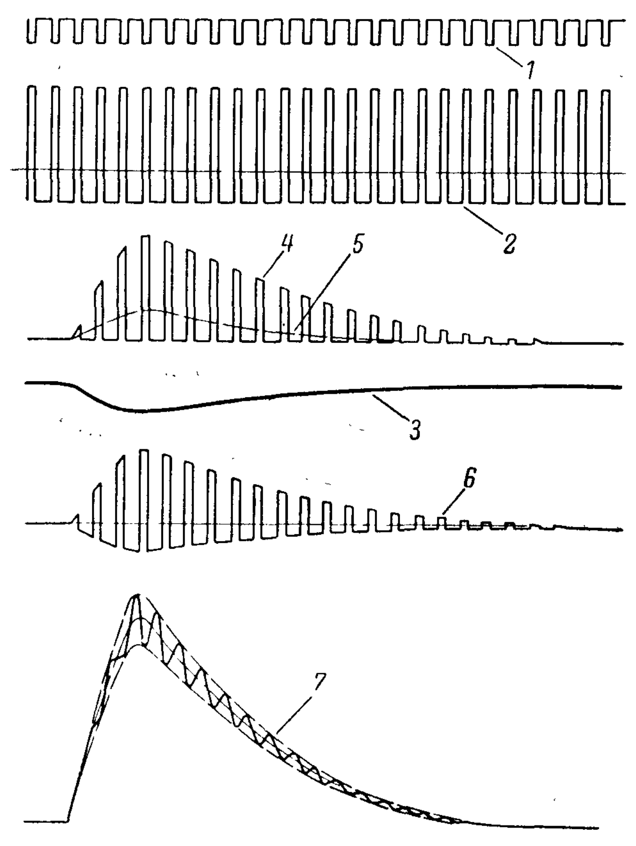


Рис. 41. Осциллограммы, характеризующие действие модулятора плоско-импульсных колебаний.

Осциллограммы, характеризующие действие модулятора, схема которого приведена на рис. 40, показаны на рис. 41. Здесь кривая *1* представляет импульсное напряжение на входе модулятора, т. е. на базе T_3, кривая *2* — напряжение на промежуточной нагрузке R_9, кривая *3* — модулирующее (управляющее) напряжение, подаваемое на базу T_1 в частном случае формирования затухающего звука с относительно мягким фронтом. Кривая *4* соответствует напряжению на выходной нагрузке R_4. Кривая *5* показывает постоянную

составляющего выходного сигнала, которая, как видно из рисунка, сравнительно с сигналом звуковой частоты весьма мала и составляет $1/\tau$ от пикового значения сигнала, если под τ понимать долю периода звуковой частоты, заполненную прямоугольным импульсом (в соответствии с обозначением, принятым в предыдущей главе). «Постоянная» составляющая выходного сигнала по форме соответствует управляющему напряжению с противоположным знаком. Поэтому, если необходимо скомпенсировать ее на выходе модулятора, можно соединить выходной сигнал с управляющим напряжением. Но следует заметить, что в случае достаточно ясно выраженной асимметрии сигнала (когда τ имеет значение 0,1—0,25) можно не применять компенсации постоянной составляющей выходного сигнала, так как помеха, вызванная ею даже при относительно жестком фронте нарастания амплитуды звука практически не прослушивается.

В другом характерном случае — модуляции симметрично прямоугольного сигнала (от октавного делителя) — желательно применять двухтактный модулятор с симметричным выходным трансформатором (по принципу схемы рис. 39 в сочетании с принципами схемы рис. 40). При этом не только обеспечивается полная компенсация управляющего напряжения на выходе, но и полностью сохраняется симметрия полупериодов сигнала на выходе, желательная для яркого воспроизведения кларнетного тембра. Если же используется однотактная модуляция такого сигнала, форма его несколько нарушается (наклон прямого и обратного фронтов волны на выходной нагрузке получается различным). Такое искажение обусловлено наличием паразитной емкостной составляющей выходной нагрузки в сочетании с различным выходным сопротивлением модулятора в режиме проводимости и отсечки.

Преимущества описанного модулятора (см. рис. 40) в импульсном режиме легко оценить, если сравнить его выходной сигнал (кривая *6* или даже *4* на рис. 41) с выходным сигналом однотактного каскада в режиме малосигнального усиления, родственного каскадам АРУ транзисторных приемников. В рассматривавшемся нами случае формирования затухающего звука выходной сигнал такого каскада имел бы вид, соответствующий кривой *7* на рис. 41. Очевидно, что составляющая управляющего напряжения в этом случае не только вызвала бы ясно слышимую помеху, но и привела бы к перегрузке последующего усилительного тракта.

Действие модулятора, собранного по схеме рис. 40, к сожалению, осложняется некоторыми неблагоприятными побочными эффектами. Сущность их состоит в том, что в паузе, когда модулирующий транзистор T_2 в основном заперт соответствующим напряжением на его базе, имеет место проникновение сигнала на выходе (R_4) за счет обратной проводимости $T_2(R_{э.к})$ и за счет емкости эмиттер — коллектор ($C_{э.к}$) этого транзистора. Эти эффекты, однако, можно в значительной мере устранить, применяя нейтрализацию сигналов «пролезания». Так как каналы пролезания имеют активный и реактивный характер ($R_{э.к}$ и $C_{э.к}$), нейтрализацию каждого компонента нужно производить отдельной цепью.

Для компенсации паразитного сигнала, проходящего за счет обратной проводимости транзистора T_2, необходимо ввести сигнал от источника звуковой частоты непосредственно на выходную нагрузку с ослаблением, соответствующим уровню паразитного сигнала на выходе, т. е. порядка —60 *дб*. Эта цепь нейтрализации

представлена на схеме рис. 40 резистором R_1, величина которого подбирается. Очевидно, что сигнал, приходящий со входа через R_1, будет способен компенсировать паразитный сигнал на R_4, поскольку фазы этих сигналов противоположны.

Компенсировать паразитный сигнал, проходящий через емкость $C_{э.к}$ транзистора T_2, более трудно, поскольку при достаточно крутых фронтах импульсов звуковой частоты емкость $C_{э.к}$ и сопротивление нагрузки R_4 образуют не делитель напряжения, а дифференцирующую цепь. При этом на R_4 будут выделяться импульсы прямого и обратного фронтов сигнала звуковой частоты, по амплитуде соответствующие самому звуковому импульсу почти без ослабления.

Амплитуду паразитных импульсов можно несколько снизить, подключая к омической нагрузке R_4 емкостный шунт C_4. Емкости $C_{э.к}$ и C_4 образуют делитель напряжения для паразитного сигнала с отношением, приблизительно соответствующим отношению $C_{э.к} : C_4$. Величина C_4, однако, не может быть слишком большой, поскольку она ухудшает частотную характеристику модулятора в рабочем диапазоне частот. Практически даже в том случае, когда в качестве модулирующего триода T_3 использован транзистор высокочастотного типа (с относительно небольшой проходной емкостью $C_{э.к}$), ослабить паразитные импульсы на R_4 за счет подключения C_4 можно не более чем на 20 *дб* (т. е. в 10 раз).

Дальнейшего подавления импульсных помех на R_4 можно достигнуть, включая нейтрализирующую емкость (триммер C_1) между источником сигнала и R_4, т. е. параллельно резистору R_1, который служит для нейтрализации паразитного сигнала в его недифференцированной форме. Для повышения плавности настройки цепи емкостной нейтрализации параллельно подстроечному конденсатору C_1 целесообразно подключить конденсатор постоянной (начальной) емкости C_2.

В заключение следует отметить, что устранять остаточный сигнал на выходе модулятора необходимо с учетом и ряда других паразитных связей входа с выходом. К таким связям относятся, например, монтажные емкости, а также активные сопротивления в общих цепях. В частности, в схеме, приведенной на рис. 40, для устранения связи входа с выходом через цепи питания выходная нагрузка (цепь коллектора T_2) включена в шину питания, снабженную развязкой (R_8C_3) от шины питания остальной части схемы. Эта развязка должна действовать и для последующей части усилительного тракта, если там не предусматриваются специальные дополнительные развязки по цепям питания для участков схемы немодулированного сигнала.

Допустимый остаточный уровень сигнала, как было указано выше, определяется условиями совместной работы модуляторов в параллельных каналах многоголосного ЭМИ или (и) совмещением действия модулятора с другими средствами регулирования уровня в последующих ступенях тракта (например, педальным регулятором громкости звука).

ДАТЧИКИ УПРАВЛЯЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

Как было указано выше, датчики управляющего напряжения для модуляторов ЭМИ могут иметь различные функции и соответственно различные схемы и другие признаки устройства.

Одна из важных форм датчика управляющего напряжения — пусковая схема с автоматическим формированием амплитудной огибающей звука при нажатии и отпускании клавишей в сочетании с педальным управлением уровнем громкости. Схема одного из возможных вариантов такого датчика приведена на рис. 42.

Здесь источник управляющего напряжения —12,6 *в* подключен к регулятору R_2, действующему от педального привода и устанавливающему уровень управляющего напряжения. В данном случае в целях повышения износоустойчивости может быть применен про-

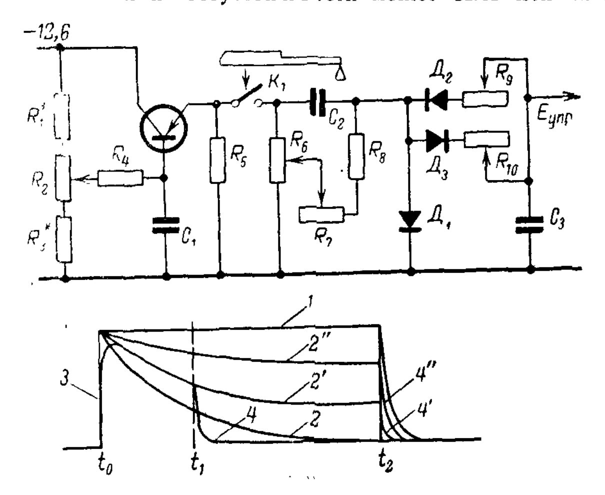


Рис. 42. Схема датчика управляющего напряжения с пусковым контактом и ее характеристики.

волочный потенциометр с профильной намоткой. Для повышения плавности регулировки в цепи ползунка можно включить фильтр R_4C_1. Пределы напряжения на R_2, соответствующие изменению громкости звука от «пианиссимо» до «фортиссимо», подбираются с помощью резисторов R_1 и R_3. Если эта цепь используется для питания множества пусковых схем и модуляторов многоголосного ЭМИ, то с целью снижения ее выходного сопротивления ползунок R_2 соединяется (через R_4) с эмиттерным повторителем на транзисторе T_1, нагрузка которого состоит из R_5 и последующих схем формирования амплитудной огибающей. Напряжение на R_5 можно определить как пусковое напряжение для последующей схемы, которая начинает действовать при замыкании контакта K_1.

Контакт K_1 в многоголосном ЭМИ действует от клавиши данного звука. Очевидно, что всего должно быть по крайней мере столько контактов, связанных с ними схем формирующих амплитудную огибающую и модуляторов, сколько клавиш имеется в клавиатуре инструмента. В мелодическом инструменте требуется всего один контакт, но с таким устройством, которое обеспечивает его срабатывание от любой клавиши клавиатуры. Во всех случаях, когда амплитудная огибающая формируется с помощью многоканальной схемы, которая описывается ниже, устройство усложняется.

При замыкании контакта K_1 в схеме на рис. 42 пусковое напряжение попадает на R_6 и вызывает зарядный ток в цепи $C_2 — R_7 — R_8$. При всех прочих равных условиях в момент включения на R_7+R_8 передается полное значение пускового напряжения, а затем, по мере снижения зарядного тока емкости C_2, напряжение на R_7+R_8 постепенно падает до величины, соответствующей положению ползунка на R_6. Если ползунок R_6 находится в нижнем положении, затухание пускового напряжения на R_7+R_8 будет полным. В других случаях затухание будет частичным, и его порог можно установить ползунком на R_6. В верхнем положении ползунка конденсатор C_2 закорачивается омнической цепью R_7+R_8 и затухания напряжения не происходит.

Поскольку напряжение от точки соединения C_2 и R_8 далее поступает в модулятор в качестве управляющего, затухающий импульс этого напряжения в конечном итоге вызывает возникновение затухающего звука. Порог затухания звука, как должно быть ясно из предыдущего, может быть задан установкой ползунка на R_6 в пределах от полного затухания до полного его отсутствия, т. е. до режима устойчиво тянущегося звука. Что касается скорости затухания, то она может изменяться в широких пределах в зависимости от изменения величины сопротивления R_7. Резистор R_8 служит ограничивающим (начальным) сопротивлением цепи затухания. Очевидно, что скорость затухания будет определяться произведением $C_2(R_7+R_8)$. Практически постоянная времени системы $C_2(R_7+R_8)$ может изменяться от 0,05 до 0,5 *сек* для мелодических ЭМИ и от 0,1 до 10 *сек* в случае многоголосных ЭМИ.

Действие описанной схемы иллюстрируется потенциально-временными характеристиками, приведенными также на рис. 42, где кривая *1* представляет пусковое напряжение с момента t_0 включения контакта K_1 и до момента его выключения: t_1 — в случае короткого звука или t_2 — в случае долгого звука. Кривая *2* представляет напряжение на R_7+R_8 в случае установки нулевого порога затухания (ползуиок на R_6 — в нижнем положении). Кривые *2'* и *2''* относятся к случаям промежуточного положения ползунка R_6. В верхнем положении этого ползунка кривая управляющего напряжения совпадает с кривой *1*.

Из кривых на рис. 42 видно, что затухание звука в случае кратковременного нажатия клавиши может быть прервано до того, как оно полностью завершится. При разрыве контакта K_1 полный или частичный заряд конденсатора C_2 устраняется диодом $Д_1$, что подготавливает схему к действию при последующем замыкании контакта.

Прежде чем попасть в модулятор, управляющее напряжение проходит через интегрирующий контур R_9C_3, формирующий фронт включения звука (кривая *3* на рис. 42). Постоянная времени этой цепи должна изменяться от 1 до 3 *мсек* — для звуков с жестким амплитудным фронтом и от 10 до 20 *мсек* — для звуков с мягким фронтом.

При отсечке звука управляющее напряжение на входе модулятора исчезает не мгновенно. Концевое затухание звука (кривые *4*, *4'* и *4''* на рис. 42) образуется за счет разряда конденсатора C_3 через R_{10}. Концевое затухание звука, как правило, должно быть более длительным, чем его фронт. Независимое действие зарядной и разрядной цепей обеспечивается введенными в них диодами $Д_2$ и $Д_3$.

Таким образом, описанная схема обеспечивает:

плавное возникновение звука при нажатии клавиши;

его последующее затухание с регулируемой скоростью до заранее установленного порога или незатухающее звучание;

плавное прекращение звука при отпускании клавиши;

регулирование громкости в течение времени звучания.

Принципиальный недостаток всех датчиков управляющего напряжения с автоматическим формированием амплитудной огибающей заключается в самом автоматизме их действия, в результате которого связь исполнителя со звуком через пальцы и клавиши сводится (лучше сказать, низводится) к включению и выключению звука. Если для примера рассмотреть варианты наложения смычка

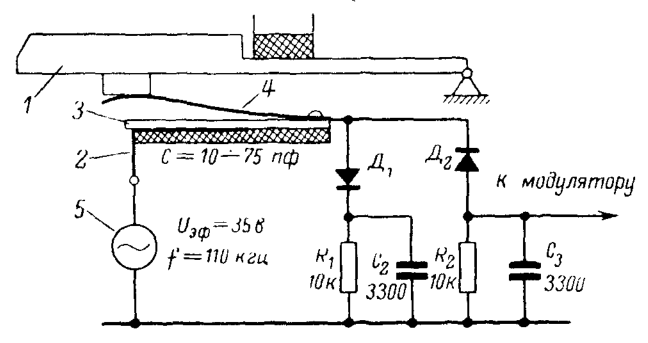


Рис. 43. Нажимной датчик управляющего напряжения.

на струны скрипки или виолончели, которые образуют широкую гамму выразительных штрихов звучания таких инструментов, должно быть ясно, что система автоматического формирования амплитудной огибающей представляется далеко не лучшей.

Системы датчиков управляющего напряжения, «отзывчивых» к приему наложения пальцев на клавиши, подразделяются на две группы:

приемники давления, в которых уровень управляющего напряжения, а следовательно, и сигнала зависит от силы н а ж и м а на клавиши, т. е. определяется статическим давлением пальцев;

приемники скорости, в которых уровень управляющего напряжения определяется импульсом силы у д а р а по клавише, т. е. кинетической энергией, передаваемой клавише и выражающейся половиной произведения действующей в такой системе массы на квадрат скорости ($0{,}5\,mV^2$).

Один из многих возможных вариантов схемы нажимного датчика показан на рис. 43. Здесь клавиша *1* связана с конденсатором переменной емкости *C*, образованным неподвижным электродом *2*, диэлектрической прокладкой *3* и упруго-гибким электродом *4*. Если клавиша не нажата, емкость конденсатора минимальна. По мере увеличения силы нажима на клавишу гибкий электрод распрямляется и прижимается к неподвижному, так что емкость конденсатора возрастает пропорционально силе нажима. Конденсатор *C* включен между вспомогательным источником напряжения высокой частоты и выпрямительным контуром $Д_2 — R_2 — C_3$, напряжение с которого и поступает на модулятор в качестве управляющего.

Такая бесконтактная система регулирования напряжения, которая отличается высокой плавностью регулировки и высокой износоустойчивостью, может быть рекомендована и для схемы с педальным приводом, показанной на рис. 42, взамен потенциометра R_2.

Нажимной подклавишный датчик дает возможность разнообразить преимущественно масштаб фронта и концевого спада звука, но не создает надежных условий дозировки устойчивых промежуточных уровней громкости в срединной фазе звучания, так как точность нажимного ощущения пальцев вообще невелика и, кроме того, сильно подвержена влиянию сопутствующих факторов, в частности, эффекту адаптации[1]. Вследствие этого система нажимных подклавишных датчиков самостоятельного значения не имеет и может употребляться только в сочетании с другими средствами формирования амплитудной огибающей.

Значительно более точно по сравнению с нажимными мускульное ощущение дозы импульсной работы, или удара, которое постоянно тренируется в различных формах практикой в реальной жизненной сфере. Поэтому не случайно музыкальные инструменты с ударной дозировкой громкости звука по динамической выразительности оказываются наиболее гибкими.

Из систем ударного дозирования громкости в клавишных ЭМИ остановимся на двух основных, одна из которых может быть названа системой с контактным датчиком ударного импульса, а другая — системой с электромеханическим преобразователем. В обоих случаях подклавишный датчик вырабатывает короткий импульс напряжения, величина которого пропорциональна силе удара по клавише, или, точнее — скорости опускания клавиши под действием удара ее пальцем. Этот ударный импульс через вентиль заряжает накопительный конденсатор относительно большой емкости, который и служит затем источником управляющего напряжения для амплитудного модулятора. В зависимости от величины сопротивления утечки, присоединенного к конденсатору, звук может иметь различное, заранее установленное время затухания. При отпускании клавиши к накопительному конденсатору присоединяется низкоомный резистор утечки — демпфер, снимающий остаточный заряд и прекращающий звук. Если еще предусмотреть возможность отключения демпфирующих утечек с помощью педали, то на таком ЭМИ можно обеспечить технику исполнения, весьма близко соответствующую возможностям классического фортепиано[2].

Схема датчика управляющего напряжения с контактным датчиком ударного импульса показана на рис. 44. Здесь конденсатор C_1 в состоянии покоя подклавишной системы подключен к источнику E_1 через контакты K_1 — K_3; кроме того, через контакт K_2 к нему также подключен резистор R_2. При ударе по клавише контакты K_1 и K_3 размыкаются и контакт K_3 движется вниз, не размыкаясь с контактом K_2. В процессе этого движения конденсатор C_1 частично разряжается на резистор R_2. В конечной стадии движения конктакт K_3 размыкается с контактом K_2 (K_2 остается на промежуточном упоре $У_2$) и смыкается с контактом K_4, так что остаточный заряд конденсатора C_1 передается накопительному конденсатору C_2.

---

[1] Здесь адаптация — потеря ясности ощущения при относительно длительных неизменных воздействиях.

[2] Авторские свидетельства № 66.154 и 113.898.

Остаточный заряд конденсатора C_1 тем больше, чем короче был промежуток времени его разряда на промежуточную утечку—резистор R_2, т. е. чем быстрее опускалась клавиша. Следовательно, начальное напряжение на накопительной емкости C_2 будет тем больше, чем больше сила удара по клавише. Поскольку напряжение с C_2 подается как управляющее на амплитудный модулятор данного канала ЭМИ, начальная громкость звука зависит от силы удара по клавише.

В схеме на рис. 44 содержатся важные дополнительные элементы, назначение которых ясно из предыдущего: R_3 — утечка кон-

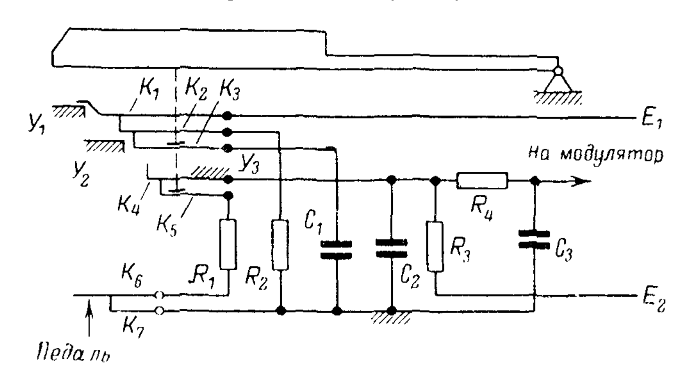


Рис. 44. Ударный датчик контактного типа.

денсатора C_2, определяющая скорость затухания звука после удара; R_1 — сопротивление демпфера для концевого затухания звука; K_5 — контакт отключения резистора R_1 при нажиме клавиши; K_6—K_7 — контакты педального отключения демпфера R_1; R_4, C_3 — цепь формирования ударного фронта; E_2 — источник напряжения, соответствующего управляющему напряжению на пороге отпирания модулятора.

На рис. 45 показана схема ударного датчика, где в качестве преобразователя механического ударного импульса в электрический использован пьезоэлемент. Здесь клавиша снабжена микроударником $У$ (размером с булавочную головку), прикрепленным к клавишному рычагу гибким стерженьком из тонкой струнной проволоки. При ударе по клавише микроударник в свою очередь ударяет по пьезоэлементу *ПЭ*, сообщая ему импульс, пропорциональный силе удара по клавише, но не опасный для пьезоэлемента (не вызывающий разрушения), так как масса микроударника ничтожна и он гибко прикреплен к клавишному рычагу. Пьезоэлемент выдает электрический импульс, пропорциональный силе удара, который используется для заряда накопительного конденсатора C_4 через диод $Д_1$. Чтобы обеспечить необходимый уровень напряжения на конденсаторе C_4, между источником ударного импульса *ПЭ* и этим конденсатором включен усилитель на транзисторах T_1—T_3 с выходным сопротивлением, достаточно низким для заряда C_4 до полного напряжения импульса за время его действия. Чувствительность системы можно регулировать изменением коэффициента усиления импульса переменным резистором R_5.

Такой преобразователь ударного импульса по сравнению с контактным ударным датчиком (рис. 44) имеет более линейную ударную характеристику и, кроме того, он более надежен, так как в нем нет сложной контактной системы. Однако существенный недостаток его заключается в необходимости иметь усилитель ударного импульса (индивидуально для каждого клавишного комплекта).

Коэффициент усиления зависит от эффективности преобразователя ударного импульса, поэтому уместно отметить, что возможны различные системы преобразователя. Так, можно применить магнито-электрический преобразователь (с магнитом, укрепленным на клавишном рычаге, и с неподвижной катушкой, подключаемой

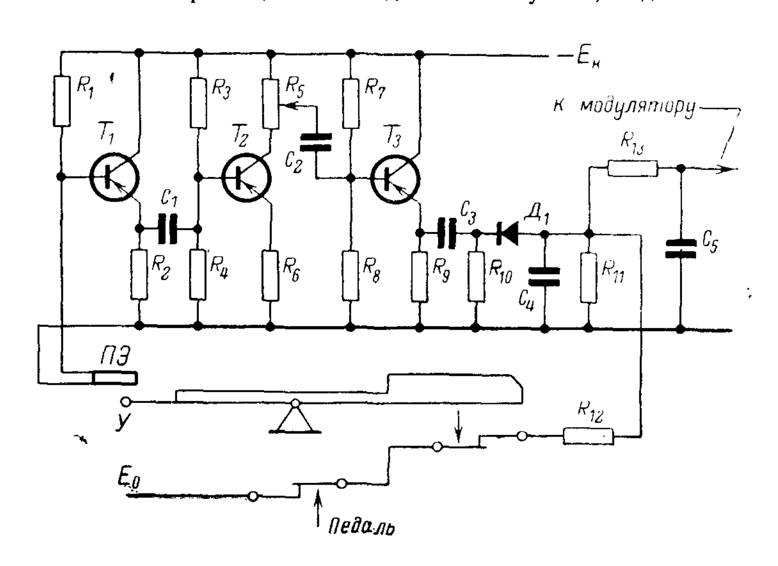


Рис. 45. Ударный датчик с электромеханическим преобразователем ударного импульса.

к входу усилителя), либо электростатический преобразователь в виде подклавишного конденсатора переменной емкости (сходного с подклавишным конденсатором на рис. 43), включенного между источником высокого поляризующего напряжения и омической нагрузкой на входе усилителя ударного импульса. Недостаток места не позволяет более подробно остановиться на деталях этого сложного и тонкого вопроса.

В схеме на рис. 45 отметим также наличие элементов, назначение которых полностью соответствует назначению аналогичных элементов схемы на рис. 44: R_{11} — резистор утечки накопительного конденсатора C_4; R_{12} — демпферный резистор для прекращения звука; контакты размыкания цепи демпфера при нажатии клавиши; контакты педального размыкания цепи демпфера; R_{13}, C_5 — цепь формирования ударного фронта; E_0 — источник напряжения, соответствующего управляющему напряжению на пороге отпирания модулятора.

ФОРМИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Как уже отмечалось выше, изменение интенсивности или амплитудной огибающей далеко не исчерпывает вопроса о динамической выразительности звука.

Одна из характерных форм взаимосвязи амплитудного и спектрального изменений заключается в прогрессивном уменьшении интенсивности спектра с понижением громкости. Подобное уменьшение было уже рассмотрено в связи с педальным регулированием громкости. В случае автоматического затухания звука такая взаимосвязь может быть обеспечена в системе двух или более параллельных каналов с автономными модуляторами и частотными фильтрами. Затухание звука в канале с более широкой полосой в области высоких частот должно происходить более быстро, что обеспечит в более поздней фазе затухания преобладание спектра с более узкой полосой, т. е. со смягченным тембром.

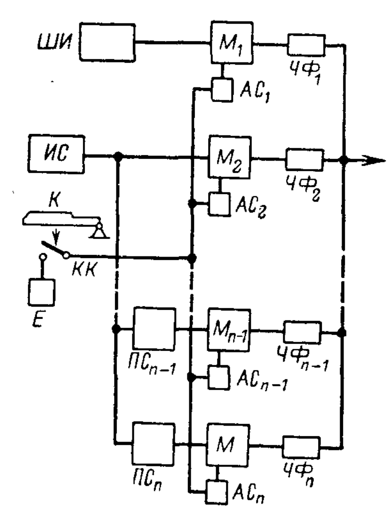


Рис. 46 Общая схема формирования сложиых переходных процессов.

На рис. 46 показана функциональная схема многоканальной системы, которая служит общей основой для формировання различных вариантов сложных переходных процессов. Схема содержит в общем случае неограниченное количество параллельных каналов n, каждый из которых содержит собственный амплнтудиый модулятор M (от M_1 до M_n) с самостоятельнымн схемами формирования амплитудной огибающей (от AC_1 до AC_n), характеристики которых не совпадают. Кроме того, каждый канал на выходе амплнтудного модулятора содержит частотный фильтр *ЧФ* с индивидуальной характеристикой для каждого канала. Входы модуляторов полностью или частично разделеиы, так что звуковая частота от источника сигнала *ИС* подается на иих либо непосредственно (как в случае модулятора M_2), либо через преобразователи спектра *ПС* с различными характеристиками, в том числе через схемы деления частоты. Модуляторы отдельных каналов (на рис. 46 — M_1) могут иметь на входе специальные автономные источники сигнала, например, источники шумового спектра (*ШИ*).

Запуск производится от источника пускового напряжения *Е* через клавишный контакт *КК* при нажатин клавиши *К* одновременно для всех каналов. На рис. 47 для примера показано формирование сложного процесса, состоящего из трех затухающих компонентов, каждый из которых имеет свой максимум ннтенсивности в соответствующий момент времени. Так как каждый компонент имеет индивидуальные спектральио-частотные признаки, в результате бу-

дет получен затухающий звук с характерно меняющейся во времени спектральиой структурой.

Из описания схемы на рис. 46 и примера, приведенного на рис. 47, должно быть ясно, что эта схема дает неограниченно широкие возможности для формирования различных сложных переходных звуковых процессов. Однако необходимо учитывать, что по мере усложнения акустической структуры процесса быстро возрастает сложиость конкретного решения для электрической схемы.

Практически в реальных схемах ЭМИ приведенный выше пример трехкомпонентиого процесса может считаться предельным по сложности воплощения. Процесс с такой структурой, в частности, подходит для имитации звука фортепиано. В этом случае исходный спектр может быть общим для всех трех компонентов, а различие составляющих должно обеспечиваться частотными фильтрами. Назначение первого компонента для данного случая может быть не столько в изменении начальной структуры спектра, сколько в придании звуку начального акцента (по амплитуде). Третий компонент должен иметь умеренно смягченный тембр для заглушениого затухания звука.

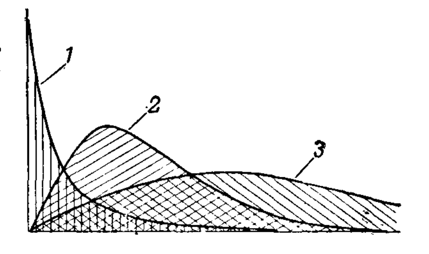


Рис. 47. Пример формирования сложного переходного процесса (затухающего звука).

Для более простого, но более колоритного случая синтеза звучания колокольчиков подходит двухкомпонентная схема, в которой первый (ударный) компонент представлен резким тембром при октавно-повышенном звучании, а второй, медленно затухающий компонент, имеет довольно глухой тембр на высоте звука, соответствующей его нотации. В канал второго компонента желательно ввести подтональное амплитудное вибрато.

Для получения тембров типа фагота и саксофона весьма полезно ввести в начальной фазе звука короткий, октавно-пониженный компонент продолжительностью в 30—50 *мсек* в сочетании с шумовым спектром.

Глава шестая

ЧАСТОТНЫЕ ФИЛЬТРЫ

НАЗНАЧЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ ФИЛЬТРОВ

Частотные фильтры представляют собой весьма важное средство формирования тембров ЭМИ, поскольку, обладая частотными характеристиками, изменяющимися в широких пределах, обеспечивают большое разнообразие звучания инструментов. Получение конкретных тембров высокой музыкальиой содержательности требует хорошо обдуманного и четкого построения конкретной частотной

характеристики ЭМИ в определенном сочетании с другими влияющими на качество звучания характеристиками (состав спектра, форма амплитудной огибающей, характер вибрато и др.).

Частотные фильтры можно разделить на две взаимосвязанные и дополняющие друг друга группы. Это широкополосные и узкополосные (формантные) фильтры. Как будет показано, схемные решения и технические требования для фильтров этих двух групп, как правило, существенно различаются. С другой стороны, в некоторых крайних случаях сужение полосы широкополосного фильтра переводит его в разряд узкополосного с возникновением при этом всех признаков форманты. Поскольку избирательность реально применяемых в ЭМИ узкополосных фильтров ограничена, применение формантных фильтров отнюдь не исключает одновременного применения с ними и широкополосных фильтров для ограничения общей полосы, создающего более контрастное ощущение формант. Однако как узкополосные, так и широкополосные фильтры могут применяться для формирования тембра независимо друг от друга.

Широкополосные фильтры могут рассматриваться как сочетание последовательно соединенных фильтров среза низших и высших частот, каждый из которых может применяться и независимо как в системах широкополосного формирования тембров, так и для контрастирования или дополнения формантной характеристики. Таким образом, в случае универсальной тембровой схемы следует предусматривать три каскада частотных фильтров:

фильтры среза низших частот;

фильтры среза высших частот;

узкополосные (формантные) фильтры, параллельно действующие на разных частотах настройки (образующие независимые параллельные каналы пропускания).

ФИЛЬТРЫ RC СРЕЗА НИЗШИХ И ВЫСШИХ ЧАСТОТ

Две основные характеристики фильтров среза низших или высших частот влияют на тембровое качество звука: частота среза, т. е. частота, соответствующая определенному уровню ослабления на скате характеристики, и крутизна среза, значение которой определяется на частоте среза и выражается в децибелах на октаву. Крутизна среза при одной и той же частоте среза может иметь в зависимости от содержания тембра весьма различное значение, в связи с чем в первом приближении можно различать фильтры с мягким, умеренным и крутым срезом.

Для фильтров с мягким срезом частота среза — понятие весьма условное и определяется оно не столько по тембровому восприятию, сколько по формальным признакам характеристики, существенным для расчета элементов электрической схемы.

Мягкий срез высоких частот образуется при использовании интегрирующей ячейки типа *RC*. Последовательное включение нескольких таких ячеек приводит к увеличению крутизны среза, однако только при условии, когда эти ячейки существенно не нагружают друг друга. Это условие соответствует случаю включения ячеек через разделительные каскады усиления, или случаю, когда при равенстве постоянных времени всех ячеек величина входящих в них активных сопротивлений прогрессивно возрастает от входа к выходу, так что в смежных ячейках сопротивление в последующем

звене, например, на порядок выше предыдущего, т. е.

$$C_1R_1 = C_2R_2 = C_3R_3 = \cdots = C_nR_n, \tag{7}$$

а

$$R_1 = 0,1\, R_2 = 0,01\, R_3 = \cdots = 10^{1-n}R_n. \tag{8}$$

Из формул (7) и (8) следует, что

$$C_1 = 10C_2 = 100C_3 = 10^{n-1}C_n. \tag{9}$$

На рис. 48 приведена схема фильтра RC и его характеристики. Кривая *1* соответствует напряжению на выходе, когда фильтр состоит из одной ячейки, кривая *2* — выходному напряжению двухзвенного фильтра и *3* — трехзвенному (когда ячейки практически не нагружают друг друга). Во всех случаях каждая ячейка имеет значение $RC = 10^{-4}$ *сек*. По этим кривым легко рассчитать, что при одном звене крутизна среза на уровне ослабления 0,5 имеет значение 5,5 *дб/октава*, в двухзвенной схеме — 8,7 *дб/октава* и в трехзвенной — 10,5 *дб/октава*.

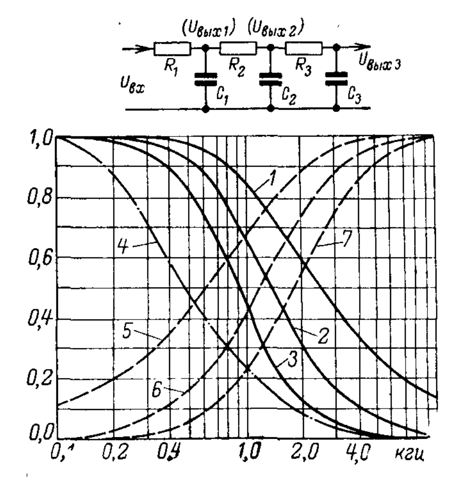


Рис. 48. Схема и характеристики RC-фильтра.

Кривая *4* на рис. 48 соответствует характеристике трехзвенного фильтра, когда сопротивления во всех звеньях (и соответственно емкости конденсаторов) одинаковы по величине. В этом случае крутизна среза сравнительно с однозвенной схемой практически не возрастает, а только смещается частота среза, но этого можно добиться и в однозвенном фильтре за счет соответствующего увеличения емкости единственного конденсатора или увеличения сопротивления единственного резистора. Таким образом, последовательно соединять идентичные интегрирующие звенья нецелесообразно.

Кривые рис. 48 позволяют приблизительно рассчитать постоянную времени звеньев фильтра для любой заданной частоты среза. Как уже было отмечено, эти кривые соответствуют значению произведения RC для каждой ячейки, равному 10^{-4} *сек*. В логарифмическом масштабе для других значений RC частотные кривые сместятся вправо или влево по частоте обратно пропорционально отношению нового значения RC к названному выше. Постоянная времени ячейки τ_1 для заданной частоты среза f_c на уровне ослабления 0,5 может быть определена по формуле

$$\tau_1 = \frac{k_1}{f_c}, \ \textit{мсек}, \tag{10}$$

где $k_п$ — коэффициент перехода от $\tau_0=0,1$ *мсек* и соответствующей ему частоты среза к τ_1 для заданной частоты f_c в фильтре, состоящем из *n* ячеек. По данным рис. 48 коэффициеит $k_п$ будет иметь следующие значения:

для однозвенного фильтра $k_п=250$;
для двухзвениого фильтра $k_п=135$;
для трехзвенного фильтра $k_п=90$.

Абсолютные значения *R* и *C* ячеек приходится выбнрать с учетом определенного внутреннего сопротнвления (R_i) предшествующего каскада и входного сопротивления $(R_н)$ последующего каскада, подключеиного в качестве его выходной нагрузки. Значение R_i должно входить составной частью в сопротивление первой ячейки R_1.

Если принять возможным упомянутое выше соотношение сопротивления последующего звена к предыдущему (10 : 1), то для трехзвенного фнльтра потребуется выдержать условие

$$R_i + R_1 = 0,1 R_2 = 0,01 R_3 = 0,001 R_н. \qquad (11)$$

В современных транзисторных схемах отношение $R_н/R_i$ имеет небольшую величину порядка 10^3. Поэтому приходится идти на некоторое снижение соотношения сопротивлений ячеек, что уменьшает эффективность фильтра по крутизне среза. Другой путь состонт в том, чтобы использовать в качестве звеньев фильтра не специальную схему на сосредоточенных ячейках, а ряд усилительных каскадов тракта ЭМИ, специально не предназначенных для этой цели. При этом внутреннее сопротивление каждого каскада может быть использовано в качестве элемента интегрирующей цепи. Очевидно, что в этом случае в каждом таком каскаде для получения данного тембра должен быть включен конденсатор, шунтирующнй высокие частоты, а емкость этого конденсатора должна быть выбрана соответственно внутреннему сопротивлению каскада по приведенным выше формулам. Одновременно подключать и отключать шунтирующие конденсаторы во всех каскадах в случае нх конструктивной разобщенности можио, например, с помощью миннатюрных реле, установленных в блоке каждого каскада.

Все что было сказано относительно интегрирующего фильтра для среза высоких частот, может быть перенесено на дуальную схему дифференцирующего фильтра *RC* для среза низких частот. На рис. 48 кривые *5, 6* и *7* показывают частотные характеристики для такого фильтра прн постоянной времени ячейки $RC=10^{-4}$ *сек* в случае одной, двух и трех ячеек соответственно.

ФИЛЬТРЫ С ПОВЫШЕННОЙ КРУТИЗНОЙ СРЕЗА

Для получения контрастного среза полосы пропускания с крутизной от 20 *дб* и более на октаву целесообразно применять комбинацию из одной ячейки типа *LC* и одной-двух ячеек типа *RC*. Поскольку добротность индуктивиого элемента в таком фильтре должна быть на уровне всего иескольких единиц, схема получается достаточно малогабаритной и несложной в осуществлении.

В качестве индуктивного элемента фильтра можно в этом случае применить пермаллоевый магнитопровод от трансформаторов усилителя низкой частоты малогабаритных переносных радиовещательных приемиков с защитой от внешних магнитных полей мед-

ным или алюминиевым кольцевым экраном. Использование такого магнитопровода требует выполнения одного условия: сборка пластин должна производиться встык с зазором 0,1—0,15 *мм*, который

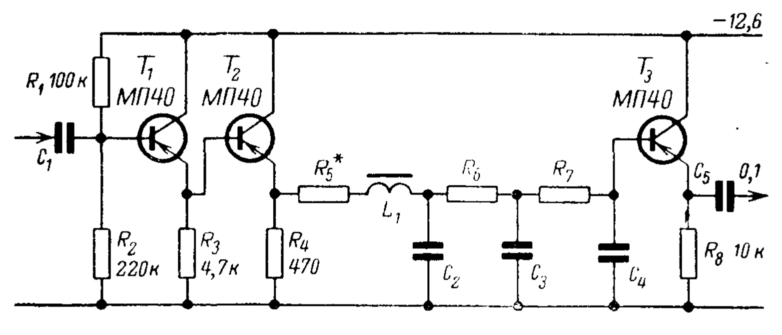


Рис. 49. Схема фильтра с повышенной крутизной среза высших частот.

заполняется прокладкой. Зазор в магнитопроводе обеспечивает стабилизацию индуктивности при колебаниях напряжения на контуре и снижает потери в магнитопроводе. Реальная добротность такого индуктивного элемента находится на уровне 3—8 единиц и мало меняется с частотой.

На рис. 49 показана схема фильтра, присоединенного к выходу источника сигнала через двойной эмиттерный повторитель. Применение такого повторителя с низким выходным сопротивлением диктуется тем, что его выходное сопротивлеиие входит в сопротивление контура L_1C_2. Для снижения нагрузки самого повторителя контуром L_1C_2 на резонансной частоте последовательно с L_1 включен резистор R_5.

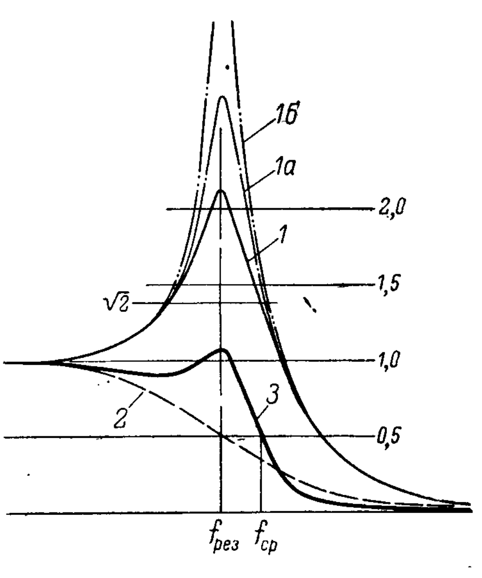


Рис. 50. Характеристики фильтра по схеме рис. 49.

Формирование частотной характеристики фильтра, схема которого приведена на рис. 49, показано на рис. 50. Зависимость напряжения на C_2 от частоты сигнала (кривая *1*) имеет асимметрично-резонансный характер. Интегрирующие ячейки (R_6C_3 и R_7C_4),

включенные за резонансной ячейкой L_1C_2, имеют монотонно падающую к высоким частотам характеристику (кривая *2*). Результирующая сквозная характеристика соответствует кривой *3*, имеющей контрастный срез за частотой, справа от резонанса. Если усиление сигнала в зоне резонанса имеет бо́льшую величину, чем то предусмотрено по характеристике *1* (кривые *1а* и *1б*), результирующая характеристика *3* будет иметь подъем усиления перед переходом к области среза.

Из рис. 50 можно вывести расчетные соотношения для схемы рис. 49. Если принять, что частота среза определяется так же, как в случае фильтра *RC*, т. е. на уровне ослабления 0,5, частоту резонанса *LC* контура необходимо установить ниже частоты среза на величину

$$\Delta f = 0{,}25 f_{\text{ср}} \text{ или } f_{\text{рез}} = 0{,}75 f_{\text{ср}}, \qquad (12)$$

где коэффициент 0,25 характеризует полосу резонанса ячейки *LC* при оптимальной добротности $Q=2$.

В определение этой добротности входит наряду со значением добротности индуктивного элемента величина поправки, вызванной влиянием выходного сопротивления эмиттерного повторителя и развязывающего резистора R_5. Приблизительно можно считать, что

$$L_1 = \frac{(1-2)\,R_1}{f_{\text{ср}}},\ \textit{гн}; \qquad (13)$$

$$C_2 = \frac{10^6}{40 f_{\text{рез}}^2 L_1} = \frac{10^6}{20 f_{\text{ср}}^2 L_1},\ \textit{мкф}. \qquad (14)$$

Электрические величины, определяющие характеристику ячеек R_6C_3, R_7C_4, должны быть выбраны с таким расчетом, чтобы в них ослабление напряжения сигнала на частоте резонанса первой ячейки компенсировало усиление в области резонанса контура *LC*, т. е. ослабление 0,5 соответствовало бы (в случае добротности *LC* контура $Q=2$) частоте резонанса. Для исключения нагрузки *LC* контура корректирующими *RC* ячейками и развязки между собой самих *RC* ячеек конденсаторы $C_2 - C_4$ выбираются с прогрессивным уменьшением емкости:

$$C_4 = 0{,}2C_3 = 0{,}04C_2, \qquad (15)$$

т. е.

$$C_3 = 0{,}2C_2, \qquad (16)$$

а резисторы с прогрессивным увеличением сопротивления

$$R_7 = 5R_6. \qquad (17)$$

При этом

$$R_7 = \frac{\tau_1}{C_4}. \qquad (18)$$

Величина τ_1 определяется так же, как для описанного выше фильтра из *RC*-звеньев (в случае двух ячеек).

Следует еще раз отметить, что поскольку сопротивления ячеек фильтра прогрессивно возрастают, нагрузка на его выходе должна

быть относительно высокоомной: входное сопротивление последующего каскада должно быть по крайней мере в 5 раз больше фактического значения R_7 (см. рис. 49). В связи с этим, чтобы согласовать фильтр с последующим трактом, необходимо включить эмиттерный повторитель и на его выходе, как и показано на том же рисунке.

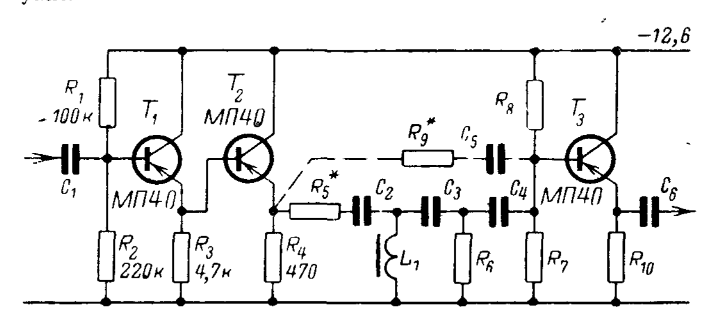


Рис. 51. Схема фильтра с повышенной крутизной среза низших частот.

Так же, как и в случае фильтра *RC*, все что было сказано относительно комбинированного фильтра для среза высоких частот, может быть перенесено на дуальную схему для среза низких частот, которая представлена на рис. 51.

МУЗЫКАЛЬНО-АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФИЛЬТРОВ СРЕЗА

В приведениых выше расчетах рассматривались только электрические характеристики фильтров. Теперь необходимо пояснить связь этих характеристик с музыкально-акустическими характеристиками фильтров и определить, насколько достижение желаемого тембрового эффекта зависит от частоты н крутизны среза фильтра.

На рис. 52 приведены частотные характеристики фильтров среза высоких (*1*) и низких (*3*) частот и спектры звуков разной высоты ($Сп_1$—$Сп_4$), привязанные к частотной оси характеристнк фильтров. Характеристики фильтров в данном случае выбраны так, что частоты срезов их совпадают; характеристикн симметричны относительно частоты 500 *гц*.

Остановимся сначала на взаимодействии спектра с фильтром среза высоких частот. Очевидно, что на очень низкий звук, представленный спектром $Сп_1$ (f_1=25 *гц*) фильтр с характеристикой *1* будет оказывать относительно слабое воздействие, так как он будет отрезать только гармоники высоких номеров (выше 20—25-й). Эти гармоники для интонационного качества очень низкого звука несущественны, а в большинстве случаев н нежелательны, ибо придают тембру звука жужжащий характер. В целом для восприятия звука воздействие фильтра на спектр можно считать в данном случае положительным.

Такое же положительное, но более четко выраженное действие фильтр с характеристикой *1* окажет и на спектр более высокого

звука ($f_1=100$ *гц*). При этом, несмотря на заметное смягчение тембра, обусловленное срезом гармоник высоких номеров (выше 7—9-й), остаются неослабленными все более низкие гармоники, существенные для интонационного качества звука. Здесь проявляется важная особенность фильтра с крутым срезом по высоким частотам: смягчение тембра не приводит к снижению интонационного качества звука, по крайней мере до тех пор, пока в полосе прозрачности фильтра остается несколько интонационно важных гармоник.

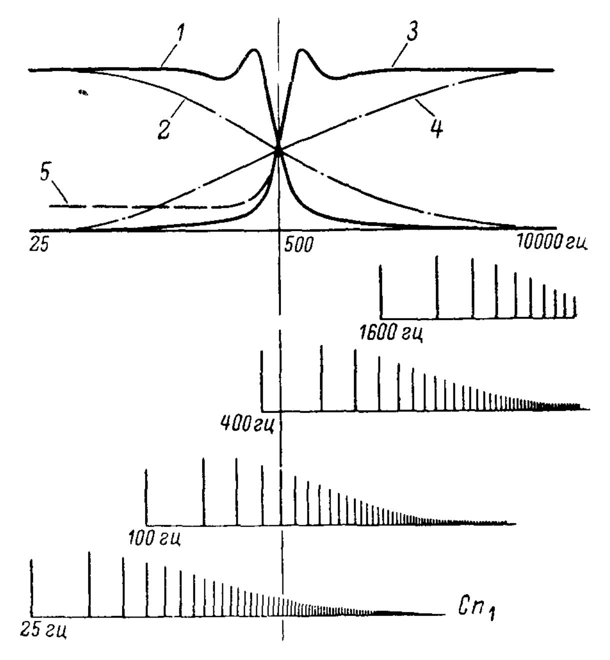


Рис. 52. Привязка частотных характеристик фильтров среза к гармоническому спектру.

Это соотношение нарушается при более высоких звуках. Так, при звуке средней высоты ($f_1=400$ *гц*) в полосе прозрачности фильтра с характеристикой *1* остается всего одна гармоника, а при высоком звуке ($f_1=1\,600$ *гц*) фильтр практически вообще не пропускает звук. Критичность частоты среза в отношении допустимой высоты звука проявляется значительно слабее, если срез плавный (кривая *2*), однако при этом в значительной степени теряется и важный результат действия фильтра — отделение гармоник с плотным расположением от гармоник интонационной зоны. Сравнительно с эффектом, получаемым с помощью фильтра с крутым срезом, действие фильтра с плавным срезом делает звук не столько более мягким, сколько более глухим, интонационно нечетким. Таким образом, фильтры с плавным срезом высоких частот должны применяться не столько для получения мягких, но интонационно полных зву-

ков, сколько для частичного заглушения слишком резких звуков, или скорее в качестве средства для получения оттенка, чем для получения тембра самостоятельного значения.

Здесь уместно сопоставить условия применения описанного фильтра в ЭМИ с условиями применения «тон-контроля» в радиовещательном приемнике или каком-либо другом устройстве электрического воспроизведения музыки.

В радиоприемнике или усилителе назначение регулятора тембра (или точнее — только регулятора ширины полосы канала) сводится главным образом к корректировке частотных искажений, имевших место в какой-либо предшествовавшей части тракта звукопередачи, или к достижению компромисса между ясностью звучания передачи и подавлением сопутствующих шумов. Изменение тембра звукопередачи в зависимости от вкуса слушателя — второстепенная задача, сомнительная по смыслу. Но так или иначе слушатель имеет дело с готовым звуковым материалом, в оригинале оптимально сформированным для музыкального восприятия. Область частотной характеристики по высоким звукам, которая подвергается при этом деформации, не опускается, как правило, ниже 3 000 *гц*.

В ЭМИ фильтр полосы воздействует на «сырой» звуковой спектр, чтобы придать ему именно те музыкальные качества, которые пока у него не существовали. Поэтому деформации, вносимые фильтром, могут быть значительно глубже. Как показывает рис. 52, частота среза по высоким частотам в 500 *гц*, совершенно не приемлемая для обычных звуковоспроизводящих устройств, здесь не только допустима, но и необходима в случае формирования тембра низких звуков. Для самого низкого регистра музыкального диапазона частота среза фильтра может опускаться и еще ниже, достигая уровня 200—300 *гц*.

Таким образом (как это отчасти должно быть ясно из материалов гл. 1), для различных регистров ЭМИ оптимальные частоты среза полосы будут также различны и, следовательно, для той или иной конкретной частотной характеристики фильтра существует (определяется этой характеристикой) оптимальный диапазон инструмента, выход за границы которого неизбежно приведет к ухудшению тембра звучания. С другой стороны, повышение частоты среза (от допустимо низкой в данном регистре) возможно, но при этом будет получен другой, более «светлый» или «открытый» тембр звука.

Изложенные соображения позволяют сделать некоторые частные выводы и вывести расчетные соотношения для применения фильтров среза высоких частот в одноголосных и многоголосных ЭМИ.

В одноголосных ЭМИ можно применять систему фильтров, например с октавным интервалом частот среза, как это иллюстрирует рис. 53. Нужный фильтр включается применительно к регистру исполняемой мелодии (или партии в ансамбле) с учетом необходимой мягкости тембра.

С учетом соотношения диапазона звуков к частоте среза высоких частот, вытекающего из рис. 52, характеристика *1* по рис. 53, очевидно, может быть использована только для звуков басового регистра — не выше малой октавы. Чтобы обеспечить полное прохождение на высшем звуке такого диапазона его первой гармоники ($f_{1макс}$) и хотя бы небольшое обогащение ее 2-й и 3-й гармониками, нужно выполнить условие

$$f_{1макс} = 0,6 f_{ср}. \qquad (19)$$

Для крнвой *1* рис. 53 ($f_{ср}$=400 *гц*) по этому условию $f_{1макс}$= =240 *гц* илн соответствует примерно *си* малой октавы. Что же касается диапазона оптимального звучания, в котором будет сочетаться полнота и мягкость звука, то его можно считать заключенным в пределах

$$f_{1\,опт} = (0,1 \div 0,5) f_{ср}, \qquad (20)$$

т. е. он будет включать в себя две октавы с терцией, приблизительно от *ми* контроктавы до *соль* малой октавы (диапазон контрабаса). Если использовать в том же диапазоне фильтры с характеристиками *2, 3* и *4,* будут получены более светлые тембры. Использовать фильтры с характернстиками вида *5* и *6* в басовом диапазоне рекомендо-

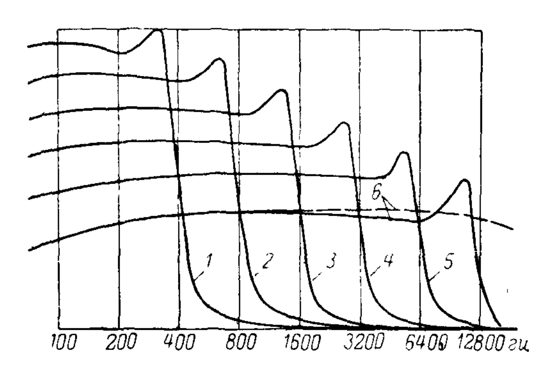


Рис. 53. Система характеристик фильтра среза высших частот для мелодического ЭМИ.

вать нельзя, поскольку в этом случае тембр звуков будет слишком резким и интонационно нечетким.

Соотношения, выведенные для басового регистра, можно перенести на более высокие регистры, для которых, если их рассматривать расположенными по октавам, будет последовательно выпадать возможность использования фильтров с характеристиками *1—5*. Однако следует иметь в виду, что в более высоких регистрах допустима большая острота тембра, чем для басового регистра, так что, например, в диапазоне виолончели (от *до* большой октавы) может стать вполне пригодным фильтр с характеристикой типа *4, 5* и даже *6*. Следует также добавить, что для получения точных имитаций некоторых тембров или для удовлетворения тонких требований к тембрам в целом октавная градация частоты среза может оказаться недостаточно тонкой.

В многоголосных ЭМИ, как вытекает из рис. 52 и из расчетов, связанных с рис. 53, получить равноценный тембр для всех регистров инструмента, если включен один единственный фильтр в канале соединенных голосов, не представляется возможным. Басы будут звучать слишком напряженно, а дискантовый участок неизбежно окажется слишком тусклым и, возможно, недостаточно громким.

Для того чтобы получить требуемую мягкость или звонкость тембра всех регистров многоголосного ЭМИ, необходнмо применять

групповые фильтры для относительно узких участков диапазона, а затем соединять их в одном или нескольких широкодиапазонных каналах. Чтобы в смежных звуках двух смежных каналов не ощущалось значительной разницы по тембру, в частотные каналы рекомендуется объединять не более 4—6 полутонов, а смежные полутона смежных каналов вводить в оба канала одновременно, но с половинным напряжением в каждый канал.

Уточним условия применения фильтра среза низких частот (рис. 52). Если проходит сигнал со спектром Cn_1 через фильтр с характеристикой *3*, на выходе будет получен совершенно немузыкальный звук, так как в полосу прозрачности фнльтра попадает участок спектра высоких, сильно уплотненных гармоник, в то время как интонационная зона спектра будет полностью отфильтрована.

Примерно то же получится и в случае спектра Cn_2. Однако если этот спектр будет пропущеи через фильтр с плавно восходящей характеристикой *4*, подавление гармоник интонационной зоны не будет носить катастрофического характера и будет получен просто очень резкий звук, пригодный для особых эффектов в ансамбле. Сходный с этим результат может быть получен в схеме фильтра с крутым срезом (см. рис. 51), если в нее ввести дополнительный резистор R_9, который обеспечивает на некотором уровне прямое прохождение низких частот на выход фильтра и создает, таким образом, ступеньку характеристики полосы пропускания со стороны низких частот, как это показано на кривой *5* рис. 52.

Для спектра типа Cn_3 (см. рис. 52) применение фильтра с характеристикой *3* прнведет к эффекту поражения только одной-двух нижайших гармоник, что не вызовет существенного снижения интонационного качества звука, но приведет к заметному изменению тембра в сторону жесткости и крикливости. Эффект этот, сам по себе не вполне музыкальный, представляет все же интерес в ансамблевой музыке. В случае спектра Cn_4, как должно быть ясно из рисунка, фильтр с характеристикой *3* (и *5*) на тембр звука влияния не окажет (поскольку через полосу прозрачности фильтра полностью проходят все гармоники спектра), а действие фильтра с характеристикой *4* будет незначительным.

Приведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что фильтры с крутым срезом низких частот создают довольно критичные соотношения для диапазона звуков с тембрами музыкального значения, и их применение требует большой осмотрительности. Их имеет смысл применять для получения характериых резких тембров в относительно узком диапазоне высоты звуков. Менее критичны фильтры с плавной характеристикой. Их применение может оказаться весьма желательным, а иногда и просто необходимым в тех случаях, когда требуется снять известную «тяжесть» звука, обусловленную гудящим характером нижайших гармоник.

ПОЛОСОВЫЕ ФИЛЬТРЫ

Представляет интерес сочетание фильтров среза высоких и низких частот для получения ряда более характерных тембров. В этом случае может быть образована полоса прозрачности для частот, ограниченных срезом как снизу, так и сверху. Ширина н положение такой полосы может иметь множество вариантов в зависимости от тембра, который надо получить, и диапазона звуков, для которого такой фильтр предназначается. Если частоты среза

$f_{макс}$ и $f_{мин}$ образуют небольшой интервал, то результирующая характеристика такого полосового фильтра по своему значению переходит в область характеристик, свойственных формантам.

ФОРМАНТНЫЕ ФИЛЬТРЫ

Обычно формаитная структура музыкальных звуков сложная. В такой структуре имеется несколько формант, обладающих определенным абсолютным положением и взаимным соотношением частот и образующих, таким образом, систему, характерную для данного тембра. Как было отмечено в гл. 1, форманты для звуков определенной интонации прослушиваются на их гармониках, определяя при этом как тембр звука, так и его интонационные качества. Взаимодействие формант со спектром звука лучше всего разобрать на примере, когда формантная система представлена всего одной-единственной формантой.

На рис. 54 приведены отображающие форманту частотные характеристики, из которых кривая *1* относится к одиночному резонансному контуру, а кривая *2* — к более сложной системе из двух связанных контуров. Под горизонтальной осью этих характеристик, так же как и в случае полосового фильтра (см. рис. 52), приведено несколько спектров, компоненты которых характерно взаимодействуют с зоной прозрачности форманты.

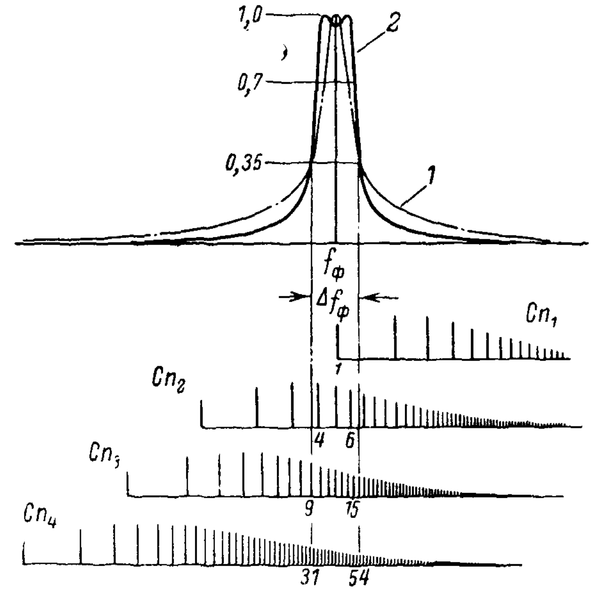


Рис. 54. Привязка формантных характеристик к гармоническому спектру.

Как видно из рис. 54, наиболее высоким звучом, с тембром, характеризующимся единственной формантой, будет звук со спектром

$Сп_1$, частота которого по первой гармонике соответствует частоте самой форманты ($f_ф$). При этом ясного формантного эффекта как такового еще не будет, но, поскольку пока еще через формантную зону проходит относительно интенсивная первая гармоника, обеспечивается удовлетворительная громкость такого высокого звука по отношению к более низким звукам. Дальнейшее увеличение высоты звука приведет к полному выпадению всех его гармоник из зоны прозрачности форманты и, следовательно, к значительному ослаблению его громкости.

Для звука со спектром $Сп_2$ (отстоящего от звука с $Сп_1$ вниз на две октавы с большой терцией) весьма благоприятно сочетаются формантная характерность с высоким интонационным качеством. Действительно, в этом случае в зону форманты попадает благозвучный аккорд 4, 5 и 6-й гармоник, энергия которого определенно преобладает над энергией остальных участков спектра.

Менее благоприятные условия для интонирования образуются в случае относительно низкого звука ($Сп_3$), когда в зону форманты попадают более плотно расположенные и менее важные для интонирования гармоники — с 9-й по 15-ю включительно. Зато тембровый эффект форманты, выражающийся в четкой обрисовке огибающей амплитуд спектра, здесь получается весьма высоким. Все же интонационные характеристики звука для данного соотношения его высоты к частоте форманты оказываются удовлетворительными, поскольку интонационно важные гармоники хорошо ощущаются слухом на восходящей (левой) части резонансной характеристики.

В последнем из представленных на рис. 54 случае, относящемся к еще более низкому звуку ($Сп_4$), очевидно невозможно получить сочетание музыкальности звука с его характерностью. В то время как обрисовка формантной зоны на спектры здесь очень четкая, интонационно важные гармоники сильно подавлены. В зону форманты попадает очень плотный участок спектра (30-я—50-я гармоники).

Таким образом, выявляется определяющая роль частоты форманты не только для тембра, но и для диапазона звука данного тембра, в котором его качество может быть признано музыкальным. Высшая частота этого диапазона $f_{макс}$ совпадает с частотой форманты

$$f_{макс} = f_{форм}. \qquad (21)$$

Что касается низшей его частоты $f_{мин}$, то по данным рис. 54 она может быть определена как

$$f_{мин} = 0,08 f_{форм}, \qquad (22)$$

и, следовательно, музыкальный диапазон одноформантного тембра ограничен величиной в 3—4 октавы. Однако лучшая его (средняя) часть составит всего две октавы — примерно от

$$f_{макс} = 0,7 f_{форм} \qquad (23)$$

до

$$f_{мин} = 0,15 f_{форм}. \qquad (24)$$

Из рис. 54 вытекает еще одно важное определение для ширины формантной зоны, составляющее отправную характеристику при расчете электрической схемы формантного фильтра. На этом рисунке формантная зона определена как полоса прозрачности, обеспечиваю-

щая одновременное усиление нескольких смежных, интонационно важных гармоник. Выделение формантой всего одной гармоники привело бы к известному нарушению воспринимаемой гармоничности спектра и к неравномерности интенсивности звука по диапазону.

В области оптимального совмещения интонационного и формантного эффектов (случай спектра $Сп_2$), как было отмечено, ширина формантной зоны определяется интервалом от четвертой до шестой гармоник, что приводит к следующему расчетному соотношению для оптимальной ширины формантной зоны

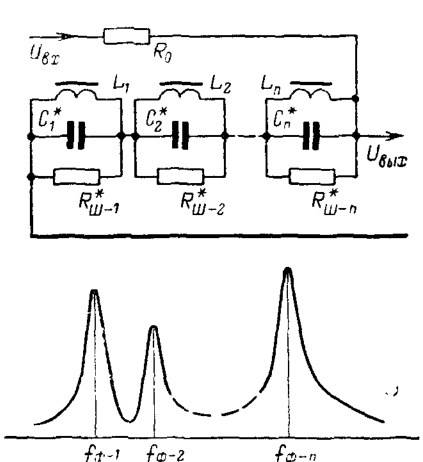


Рис. 55. Схема и характеристики формантного фильтра из одиночных контуров.

$$\Delta f_{форм} = 0{,}4 f_{форм}. \qquad (25)$$

Это выражение позволяет перейти от музыкально-акустических характеристик форманты к определению электрических параметров формантного контура в электрической схеме. Как известно, добротность Q одиночного резонансного контура определяется по полосе пропускания $\Delta f_к$ на уровне усиления 0,7 от его значения на частоте резонанса f_0:

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f_к}. \qquad (26)$$

Если принять, что $\Delta f_к = \Delta f_{форм}$, то для добротности формантного контура получим значение $Q_{ф.к} = 2{,}5$. Однако, как видно из рис. 54, полоса пропускания для кривой *1* на уровне 0,7 характеризует (так же, как и в радиотехнических устройствах) скорее неравномерность усиления в области резонанса, чем усиление в форманте по сравнению с боковыми зонами. В данном случае нет четких границ между зоной, которую можно считать формантной, и зонами, которые можно принять за боковые. Однако контраст усиления в форманте обнаруживается на уровне, по крайней мере в 2—3 раза более низком, чем упоминавшийся уровень 0,7. Поэтому действительное значение оптимальной добротности одиночного контура, используемого для образования одноформантного тембра, находится в пределах

$$Q_{ф.к} = 5 \div 8. \qquad (27)$$

Четкость обрисовки формантной зоны относительно боковых зон значительно повышается при двухконтурной системе (см. рис. 54, кривую *2*). В этом случае также повышается равномерность усиления гармоник в форманте. Недостаток двухконтурных формант заключается в усложнении электрической схемы, особенно заметном при системе с несколькими формантами.

На рис. 55 показана электрическая схема для системы из нескольких одноконтурных формант и ее частотная характеристика, на рис. 56 — аналогичная схема и частотная характеристика для нескольких двухконтурных формант. Как видно из рис. 55, одиночные контуры могут быть соединены в простую последовательную цепочку, в которой перестройка частот отдельных контуров или их включение осуществляется простыми средствами. В схеме рис. 56 переход с одной формантной частоты на другую практически возможен только путем включения в параллельных каналах заранее настроенных двухконтурных формант с необходимым резервированием по частотам настройки. Поэтому в техническом отношении одноконтурные форманты могут оказаться более предпочтительными, однако, правильность этого вывода может быть окончательно определена только в конкретной схеме коммутации тембров, относящейся к определенному ЭМИ.

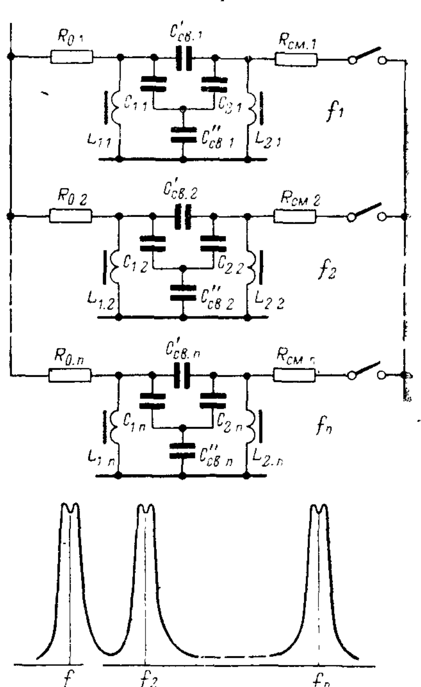


Рис. 56. Схема и частотная характеристика для нескольких двухконтурных формант.

Недостаточную избирательность одноконтурных формант в схемах конкретных тембров можно в известной мере компенсировать, дополняя формантную систему фильтрами среза по схемам на рис. 48, 49 или 51. Необходимо, правда, уточнить, что понятие достаточной или недостаточной избирательности форманты вытекает из музыкальной задачи данного конкретного тембра, а не из каких-либо технических норм, относящихся к электрической схеме.

РАСЧЕТ И НАСТРОЙКА ФОРМАНТНЫХ ФИЛЬТРОВ

Добротность формантных контуров непосредственно зависит от конструкции индуктивного элемента. Выбирая соответствующую конструкцию, можно обеспечить необходимую величину добротности.

В гл. 3 были описаны резонансные контуры для схем ведущих генераторов многоголосных ЭМИ, которые в принципе могут быть использованы и в качестве формантных контуров. Отличие формантных контуров состоит, однако, в том, что их частоты занимают значительно более широкий диапазон (примерно от 200 до 8 000 *гц*).

а их добротность, как это ясно из изложенного выше, должна иметь определенную оптимальную (но не максимально возможную) величину.

Добротность низкочастотного контура практически полностью определяется добротностью его индуктивного элемента. При данном весе магнитопровода, входящего в индуктивность контура, наихудшая добротность получается для наинизшей частоты его настройки. Для магнитопроводов с малыми потерями — из материала типа альсифера или оксифера — за сопротивление потерь в индуктивности можно принять сопротивление обмотки.

Так как

$$Q = \frac{\omega L}{R}, \tag{28}$$

или

$$Q = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}}, \tag{29}$$

то добротность контура будет увеличиваться пропорционально частоте. Добротность катушки, выполненной с применением броневого сердечника Сб-5, на частоте 500 *гц* составляет приблизительно 5—8. Примерно такая же величина добротности получается и для катушки, выполненной на ферритовом кольце ($\mu = 2\,000$) с внешним диаметром 17 *мм*. В последнем случае получается значительный выигрыш по весу, габаритам контура и его нечувствительности к внешним магнитным полям. Однако устойчивость частоты настройки в зависимости от уровня действующего напряжения оказывается низкой: при изменении напряжения от 0,1 до 10 *в* частота резонанса снижается примерно на 25%. Таким образом, ферритовые магнитопроводы без воздушного зазора для формантных контуров применять нельзя.

Сочетание малых потерь, высокой стабильности и помехозащищенности обеспечивается в случае применения для формантных контуров торроидных альсиферовых сердечников. Их недостатки заключаются в сложности многовитковой намотки и относительно высокой стоимости.

Как и в случае полосовых фильтров, в формантных контурах можно применять индуктивные элементы с пермаллоевым магнитопроводом типа трансформаторов низкой частоты малогабаритных радиоприемников. При этом обязательным условием должны быть сборка сердечников встык с воздушным зазором и применение экранировки от внешних магнитных полей. Магнитопроводы из высокоэффективных магнитных сплавов отличаются значительным увеличением потерь по мере повышения рабочей частоты. Ввиду этого добротность контура с таким магнитопроводом (в отличие контура с магнитопроводом из альсифера) практически не меняется с частотой и остается равной примерно 3,5—5 для наименьших типоразмеров и 5—8 для средних типоразмеров магнитопроводов трансформаторов маломощных усилителей низкой частоты. Такая добротность может быть достаточной для контуров, настроенных на относительно низкую частоту, а для двухконтурных формант — и на более высоких частотах.

В сложных формантных системах, помимо добротности контуров, важное значение может иметь их резонансное сопротивление $Z_{о.е}$, ко-

торое, как известно, определяется выражением

$$Z_{о.е}=Q\sqrt{\frac{L}{C}}. \qquad (30)$$

В схеме на рис. 55 высота резонансных пиков, относящихся к отдельным контурам, при условии, что $R_0 \geqslant (3-10) Z_{о.е}$ будет пропорциональна резонансному сопротивлению этих контуров. Поэтому, если требуется получить одинаковое усиление сигнала на всех резонансных частотах, необходимо стремиться к сохранению постоянными величин Q и L/C для всех входящих в цепь контуров. Нежелательное преобладание усиления в отдельных контурах можно устранить, включая резисторы, шунтирующие контуры, и подбирая величину их сопротивления. В схеме на рис. 56 балансировку усиления на частотах отдельных формант можно осуществить, подбирая величину сопротивлений смесительных резисторов $R_{см}$.

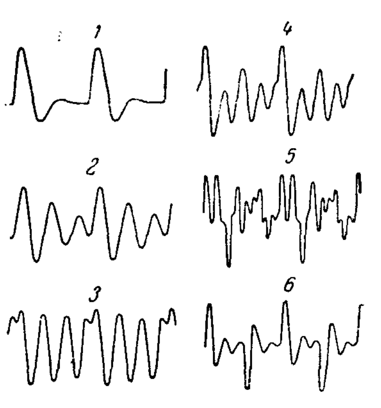


Рис. 57. Осциллограммы на выходе формантного фильтра.

Настройку формантного фильтра необходимо проверить, сняв его частотную характеристику в целом.

Помимо частотных характеристик действие формантного фильтра наглядно иллюстрируется осциллограммами колебаний на его выходе при подаче на его вход сигнала в форме быстрозатухающих экспоненциальных импульсов. Несколько характерных осциллограмм такого рода показано на рис. 57, где кривая *1* характеризует действие фильтра с единственным контуром при весьма низкой (недостаточной) добротности, кривая *2* — тот же случай при умеренной (нормальной) добротности и кривая *3* — при повышенной добротности контура. Кривая *4* соответствует сигналу на выходе фильтра с двумя различными резонансными частотами, что проявляется в наличии биений на формантных частотах внутри основного периода, кривая *5* отражает более сложный случай трехформантного (трехчастотного) фильтра. Особый случай представлен кривой *6* — когда на одиночный контур воздействует напряжение с двумя участками крутого перепада (например, напряжение от бинарного делителя частоты). В этом случае внутри основного периода звуковой частоты наблюдаются два всплеска формантной частоты, отличающиеся симметричной полярностью. Это показывает, что для конкретного тембра звука характерны не только формантные частоты, а соединение определенной формантной характеристики с соответствующими характеристиками возбудителя колебаний.

Еще более сложные закономерности выявляются на осциллограммах, относящихся к прохождению сигнала определенной формы через последовательную систему формантных и широкополосных фильтров. Фильтры среза крайних (заформантных) частот и по слуховому ощущению и по виду осциллограмм усиливают действие формант, не затрагивая, однако, характеристик межформантных зон.

Таблица 4

Структурные признаки некоторых известных тембров

№ п/п.	Тембр (инструмент)	Относительная ордината максимума/Частота форманты, *гц*	Характер среза, частота среза полосового фильтра, *гц*		Импульс возбудителя (профиль волны) и временная характеристика	Постоянная времени, *мсек*		Примечания
			снизу	сверху		начала звука	концевого затухания	
1	Флейта пикколо	—	Жесткий, 1 500	Жесткий, 4 200	Экспоненциальный $\tau=0,1$ *мсек*	2—5	10—15	Вибрация звука не допускается
2	Флейта	—	Жесткий, 750	Жесткий, 2 100	Экспоненциальный $\tau=0,2$ *мсек*	5—20	20—30	То же
3	Гобой	0,5/1 800; 1,0/3 600	Мягкий, 1 000	Жесткий, 4 200	Экспоненциальный $\tau=0,1$ *мсек*	1—5	5—10	—
4	Кларнет in E_s	—	Мягкий, 750	Жесткий, 6 000	Симметричный прямоугольник	10—15	20—30	Вибрация звука не допускается
5	Кларнет in B	—	Мягкий, 500	Мягкий, 2 000	Симметричный прямоугольник	10—15	20—30	То же

Продолжение табл. 4

№ п/п.	Тембр (инструмент)	Относительная ордината максимума/Частота форманты, *гц*	Характер среза, частота среза полосового фильтра, *гц*		Импульс возбудителя (профиль волны) и временная характеристика	Постоянная времени, *мсек*		Примечания
			снизу	сверху		начала звука	концевого затухания	
6	Английский рожок	1,0/1 000; 1,0/2 000; 1,0/3 000	Жесткий, 750	Жесткий, 4 200	Экспоненциальный $\tau=0,3$ *мсек*	2—5	10—15	—
7	Фагот	0,6/430; 0,6/570; 1,0/1 000	Жесткий, 350	Жесткий, 2 100	Прямоугольный $\tau=(0,05—0,2)T$	1—5	5—10	—
8	Контрафагот	1,0/300; 0,5/400; 0,5/600; 0,5/1 500	Мягкий, 150	Жесткий, 1 500	Прямоугольный $\tau=(0,05—0,2)\ T$	2—5	10—15	—
9	Труба с сурдиной	1,0/4 000; 1,0/6 000	—	—	Экспоненциальный $\tau=0,2$ *мсек*	5—10	10—15	—
10	Труба	0,7/1 250; 1,0/1 750; 0,7/2 250	—	Жесткий, 6 000*	Экспоненциальный $\tau=0,2$ *мсек*	1—10**	5—30	* Исполнительски переменная ** Сложной структуры

Продолжение табл. 4

№ п/п.	Тембр (инструмент)	Относительная ордината максимума/Частота форманты, *гц*	Характер среза, частота среза полосового фильтра, *гц*		Импульс возбудителя (*профиль волны*) и временная характеристика	Постоянная времени, *мсек*		Примечания
			снизу	сверху		начала звука	концевого затухания	
11	Тромбон	—	Жесткий, 600	Жесткий, 3 000*	Экспоненциальный $\tau=0,5$ *мсек*	1—30**	5—30	* Исполнительски переменная ** Сложной структуры
12	Валторна	—	Мягкий, 150	Жесткий, 350—500	Прямоугольный $\tau=(0,1\div0,4)\ T$	10—15	20—30	Слабая автоматическая вибрация на низкой частоте (3—5 *гц*)
13	Туба	—	—	Жесткий, 250	Прямоугольный $\tau=(0,1\div0,4)\ T$	10—15*	20—30	
14	Скрипка	0,4/500; 0,6/750; 1,0/1 250; 0,4/4 000; 0,8/6 000	—	*	Прямоугольный $\tau=(0,12\div0,33)\ T$*	10—15	20—30**	* Автоматическая регулировка полосы и ширины импульса по высоте звука с дополнением вариации ширины полосы исполнительскими средствами ** Без учета приемов спиккато, пиццикато и т. п.
15	Виолончель	0,4/300; 0,5/400; 0,5/600; 0,6/1 600; 0,8/2 400; 1,0/3 200	—	*	Прямоугольный $\tau=(0,1\div0,3)\ T$*	10—15	20—30**	

Для более четкой характеристики настройки формантных и полосовых фильтров в связи с задачей получения определенных тембров в табл. 4 приведены конкретные данные частотных фильтров для ряда известных тембров, а также важные для воспроизведения этих тембров характеристики возбуждающего спектра, типичного начала и окончания звука и некоторые дополнительные характеристики.

Глава седьмая

О НЕКОТОРЫХ БЛОКАХ ТРАКТА ЭМИ

РЕВЕРБЕРАТОР

Качество восприятия музыки довольно существенно зависит от эффекта реверберации. Реверберация создает усиловия для некоторой слитности звуков, идущих в мелодической или гармонической последовательности, и при их частичном наложении обостряет ощущение диссонансов и консонансов.

Система искусственной реверберации была применена в ЭМИ типа орга́на с целью смягчения жесткой атаки и особенно жесткого, отрывистого окончания звука. Систему искусственной реверберации так же (или в еще большей мере) целесообразно применять в мелодических инструментах, так как это позволяет получить наслоение звуков различной высоты при исполнении их приемами тремоло и арпеджио. Безотносительно к специальному музыкальному эффекту искусственная реверберация дает возможность скомпенсировать недостаток естественной реверберации в небольшом помещении и притом так, что добавочная реверберация будет проявляться только в отношении ЭМИ.

Обычный недостаток применения реверберанора заключается в том, что пропадает одна из существенных черт восприятия реверберирующего звука — ощущение пространства. Это вызвано тем недостатком в конструкции, что сигнал с выхода ревербератора подается на основной выход ЭМИ. Чтобы избежать такого урона, необходимо выход ревербератора через отдельный усилитель (пониженной мощности) подключать к специальной линии громкоговорителей, расположенных в наиболее удаленных от слушателей точках помещения, что приведет к слуховой иллюзии объемно рассеянного звука.

Другой недостаток применения ревербератора — в чисто музыкальном плане — заключается в том, что обычно не предусматриваются музыкально-исполнительские средства выключения канала реверберации и, что еще важнее, — средства мгновенного демпфирования реверберирующего элемента, в результате чего исполнение музыки начинает напоминать игру на рояле при постоянно нажатой правой педали. Эти замечания следует учитывать, если хотят достичь в ЭМИ музыкально полноценного использования ревербератора.

Схема практически единственного применяемого в ЭМИ ревербератора пружинного типа показана на рис. 58. Здесь сигнал с выхода предварительного усилителя $У_1$ подается на магнитоэлектрические возбудители $В_1$ и $В_2$ пружинных вибраторов $ПВ_1$ и $ПВ_2$, которые иногда не совсем верно называют линиями задержки. Под влиянием

возбудителей в вибраторах на частотах сигнала возникают многократно отражающиеся от их концов и постепенно затухающие крутильные механические колебания. Эти колебания вновь преобразуются в электрические приемниками $П_1$ и $П_2$, присоединенными к противоположным от возбудителей концам вибраторов $ПВ_1$ и $ПВ_2$.

По отношению к сигналу на входе системы напряжение на приемниках $П_1$ и $П_2$ возникает с задержкой, характеризующей время, необходимое для распространения фронта возбуждения по вибратору от возбудителя до приемника, что и дает некоторое основание классифицировать этот вибратор как линию задержки. Однако главный

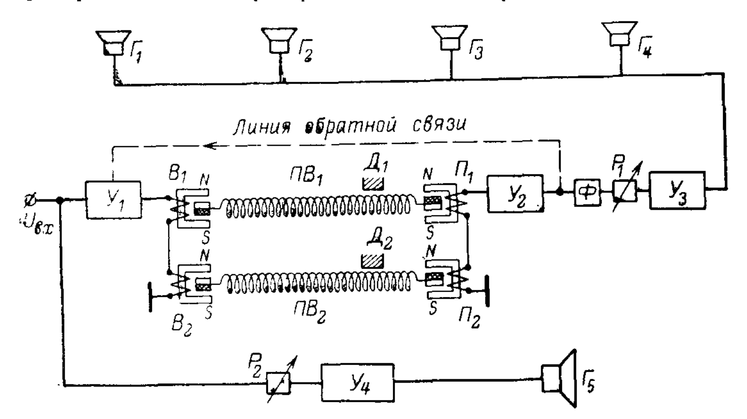


Рис. 58. Пружинный ревербератор со схемой выхода.

результат действия ревербератора состоит в том, что после первой волны сигнала в катушках приемников возникают многократно затухающие повторения сигнала — подобно тому, как это имеет место со звуковыми волнами, когда они попеременно отражаются с некоторым затуханием от противоположных стен помещения.

Геометрические характеристики линий $ПВ_1$ и $ПВ_2$ несколько различны, поэтому время задержки в них неодинаково (составляет примерно 29 и 37 *мсек*). В результате амплитудные толчки прихода волн к приемникам $П_1$ и $П_2$ несколько сглаживаются и образуется в первом приближении плавно затухающее послезвучание. Чем большее число пружинных вибраторов с различными характеристиками применяется, тем более плавный получается отзвук и лучшая апериодичность системы. Плавность затухания можно дополнительно повысить с помощью линии обратной связи с выхода усилителя $У_2$ (включенного на выходе приемников $П_1$ и $П_2$) на вход (или промежуточный каскад) усилителя $У_1$. Усилитель $У_2$ — необходимый элемент системы, так как напряжение сигнала на катушках $П_1$ и $П_2$ значительно (примерно на 40 *дб*) ниже напряжения, которое подается на катушки $В_1$ и $В_2$.

Время полного затухания сигнала в реверберааторе при отсутствии демпфирования может достигать 2 *сек*. Чтобы обеспечить относительно равномерное прохождение всех частот сигнала через реверберaтор (в диапазоне от 70 до 5 000 *гц*), применяется коррекция частотной характеристики с помощью фильтра Ф. С выхода фильтра Ф

сигнал через регулятор уровня P_1 и усилитель мощности $У_3$ подается на линию громкоговорителей $Г_1$—$Г_4$.

В главную акустическую систему $Г_5$ основной сигнал через регулятор уровня P_2 и основной усилитель мощности $У_4$ подается независимо от линии ревербератора.

Для приведенных выше характеристик (времени задержки, общего времени затухания и полосы пропускания) вибраторы выполняются из стальной проволоки диаметром 0,3 *мм* с наружным диаметром витка 4,2 *мм*. Длина проволоки в пружине около 4 *м*. Длина пружин вибратора около 400 *мм*. Чтобы устранить механические и внешние акустические воздействия на вибраторы, их мягко подвешивают к массивной раме и помещают в звукозаглушающий корпус. Чтобы дополнительно притупить чувствительность вибраторов к внешним воздействиям, направление навивки пружин во вторых их половинах изменяется на противоположное.

Время полного затухания ревербератора можно широко варьировать с помощью мягких демпферов ($Д_1$ и $Д_2$). Как было указано выше, музыкально ценная система должна содержать привод для включения и выключения демпферов в качестве исполнительского органа.

В целом, как, по-видимому, ясно из данного описания, ревербератор представляет довольно сложную и деликатную систему, применение которой экономически оправдывается пока только в относительно дорогих ЭМИ.

УСИЛИТЕЛЬНЫЕ И ЗВУКОВОСПРОИЗВОДЯЩИЕ УСТРОЙСТВА

Выходные усилители ЭМИ относятся к усилителям повышенной мощности, поскольку ЭМИ, как правило, используются в условиях концертного зала и в других помещениях коллективного назначения. Требования к выходной мощности и допустимому коэффициенту нелинейных искажений усилителей многоголосных и одноголосных ЭМИ существенно отличаются.

Для концертных многоголосных ЭМИ при использовании громкоговорителей со средним стандартным звуковым давлением 0,3—0,4 *н/м²* следует считать нормальной мощность выходного усилителя на уровне 50 *вт* и более при коэффициенте нелинейных искажений не более 1—2%. Такие относительно высокие требования обусловлены как необходимостью обеспечить достаточную громкость звучания ЭМИ в помещениях увеличенной кубатуры, так и особенностями состава сигнала, подлежащего усилению.

Одна из особенностей сигнала многоголосных ЭМИ состоит в постоянстве амплитуды каждого тона, характерном для инструментов типа орга́на. При этом в отличие от условий электрического воспроизведения, например звучания фортепиано с быстро затухающими высокими звуками, разностные тоны аккордов среднего и высокого регистров, даже если уровень их громкости не очень значителен, в ЭМИ хорошо прослушиваются.

Другую особенность представляет обычное для тех же инструментов специфическое соединение амплитуд сигналов, находящихся в октавном соотношении. Поскольку такие сигналы образуют цепи делителей, связанных между собой общим моментом запуска от ведущего генератора, их соединение неизбежно приводит к прямому

суммированию амплитуд на совпадающем фронте сигналов, что, естественно, поглощает ресурсы неискаженной нагрузки усилителя по входу. В некоторые моменты времени происходит прямое суммирование максимальных значений для сигналов различной высоты, тем более заметное, чем проще форма сигнала и чем он более точно повторяется.

В случае прохождения через усилитель микрофонного сигнала от какого-либо обычного музыкального инструмента, например того же фортепиано, строгое суммирование максимальных значений сигналов практически не наблюдается, поскольку форма таких колебаний значительно более сложная, чем у электрооргана и несовпадающая для разных октав, а реальные условия жесткой синхронизации их начальной фазы отсутствуют, поэтому фазы максимумов рассеиваются. Тем менее вероятно суммирование амплитуд звуков аккорда с несинхронной вибрацией и различными тембрами, характерного для ансамбля различных по своим свойствам инструментов в оркестре.

Перегрузка усилителя в электронном орга́не при сильном увеличении громкости обычно проявляется неожиданно и резко. Поэтому приходится выбирать такой режим нагрузки усилителя по входу, который в «форте» не подводит усилитель к порогу искажений. Однако на действительное использование его номинальной мощности[1] рассчитывать не приходится.

Выполнение транзисторных усилителей на мощность 50—100 *вт* все еще представляет известные трудности, а их преимущества на этом уровне мощности в известной мере сводятся на нет неизбежными требованиями использовать высокоэффективные (громоздкие и сложные) теплоотводы для транзисторов выходного каскада. Ввиду этого в настоящее время для многоголосных инструментов типа органа все еще характерно применение выходных ламповых усилителей в то время как вся остальная часть их электрической схемы собирается на полупроводниковых приборах.

Выходные усилители целесообразно выполнять в виде самостоятельных блоков с собственной схемой питания, что дает возможность выбирать их конкретную мощность в зависимости от условий применения инструмента и использовать несколько одинаковых усилителей, если необходимо озвучить помещения большого объема. Такое решение целесообразно еще и потому, что в случае автономной конструкции усилительного блока повышенной мощности, который имеет относительно большой вес и выделяет значительное количество тепла, проще решается проблема надежности и эксплуатационного удобства как собственно инструмента, так и усилителя. При этом в самом инструменте следует предусматривать усилитель малой мощности (на 1—3 *вт*), который может использоваться не только в качестве драйвера мощных выходных каскадов, но и для питания малой акустической системы, вмонтированной непосредственно в инструмент и используемой при репетиционной работе в условиях небольшой комнаты или в тихом зале. Такой усилитель можно выполнить на

---

[1] Следует напомнить, что мощность усилителя, определяемая при усилении синусоидального сигнала, только номинально характеризует его отдачу в режиме усиления сложного сигнала, и в электронном орга́не по упомянутым выше обстоятельствам отношение действительной мощности к номинальной оказывается весьма невыгодным.

транзисторах с применением двухтактного выходного каскада в режиме класса А.

Что касается схем мощных выходных ламповых усилителей, то они могут быть заимствованы из известной литературы по усилительной технике и приводить их здесь не имеет смысла.

Мощность усилителя находится в квадратичной зависимости от среднего стандартного звукового давления присоединенной к нему акустической системы. Поэтому представляет значительный интерес использование громкоговорителей с повышенной отдачей по звуковому давлению — даже несмотря на то, что их вес значительно больше, чем у обычных стандартных громкоговорителей.

Определенного повышения эффективности отдачи выходного устройства многоголосных ЭМИ можно достигнуть с помощью многоканального выхода, когда в каждом канале оказывается только часть одновременно воспроизводимых звуков. Разделение каналов по диапазонам звучания (басовый, средний, высокий диапазоны) упрощает требования к полосе воспроизведения частот в каждом из каналов, снижает уровень воспроизведения разностных тонов и обеспечивает возможность простыми средствами устанавливать тембр и громкость регистров независимо по каналам. Резко снижается необходимая мощность для каждого из каналов. Таким образом, в целом существенно упрощаются конструктивные требования к усилителям. Кроме того, достигается известная рельефность звучания, обусловленная пространственным рассредоточением звуков разной высоты.

Примерные сравнительные данные равноценных выходных систем для многоголосного инструмента в случае одноканального и трехканального выходов приведены в табл. 5.

Таблица 5

Сравнительная характеристики одно- и трехканального выходного устройства многоголосного ЭМИ

Характеристика	Одноканальный вариант	Трехканальный вариант		
		басовый канал	средний канал	верхний канал
Мощность усилителя, *вт*	100	30	20	15
Мощность акустической системы, *вт*	100	30	15	10
Полоса частот, *гц*	80—7 000	60—2 500	300—5 000	800—9 000
Допустимый коэффициент нелинейных искажений, %	1,0	3,0	2,0	1,0
Угол эффективного излучения звука, угловые градусы	90*	180	180	180**

* Для высоких частот

** Расширение угла эффективного излучения звука достигается путем веерообразного расположения нескольких маломощных громкоговорителей в этом канале.

Для концертного применения мелодических ЭМИ при использовании громкоговорителей со средним стандартным звуковым давлением на уровне 0,3—0,4 *н/м*² следует считать достаточной мощность

выходного усилителя 12—20 *вт* при коэффициенте нелинейных искажений 5—8%. Названная величина искажений допустима, если только указанные искажения не проявляются в виде высоких гармоник, т. е. если искажение синусоидального сигнала не приводит к образованию резких перегибов на профиле волны (это условие важно при воспроизведении заглушенных тембров). Полоса частот усилителя определяется по суммарным требованиям к воспроизведению заложенных в инструменте тембров.

Относительно легко выполнимые требования к уровню выходной мощности и к уровню нелинейных искажений, предъявляемые к усилителям одноголосных ЭМИ, создают благоприятные условия для выполнения таких усилителей на транзисторах распространенных типов. На рис. 59 в качестве примера приведена схема усилителя на мощность до 15 *вт*, который отличается высокой надежностью и простотой наладки. Входная чувствительность усилителя находится на уровне 0,3 *в*.

Усилитель (рис. 59) содержит входной эмиттерный повторитель на транзисторе T_1, каскад усиления по напряжению на T_2 с повторителем T_3 и три каскада усиления по мощности в схеме с общим коллектором, первый из которых (T_4) работает в однотактном режиме класса А, а второй (T_5—T_6) и третий (T_7—T_8) — в классе В по двухтактной схеме. Применение схемы с общим коллектором позволяет значительно упростить условия для неискаженного усиления сигнала и резко снижает выходное сопротивление усилителя, что важно для устранения переходных процессов в громкоговорителе, особенно при воспроизведении быстро затухающих звуков с жесткой атакой. Выходные каскады усилителя малочувствительны к пульсации питающего напряжения.

Основная выходная обмотка (*Выход 1*) имеет переключатель $П_1$ для перехода с нагрузки громкоговорителями на их эквивалент (R_{18}). В этом случае включается телефонный капсюль, используемый при репетиционной работе. Предусмотрена дополнительная

Таблица 6

Намоточные данные трансформаторов усилителя одноголосного ЭМИ (к схеме на рис. 59)

Характеристика трансформатора	$Тр_1$	$Тр_2$	$Тр_3$
Сердечник (сечение магнитопровода, *мм*)	Ш 12×12	Ш 12×12	Ш 20×20
Первичная обмотка:			
число витков	750	300+300	110+110
диаметр, *мм*, и тип провода	0,15 ПЭВ	0,15 ПЭВ	1,0 ПЭВ
Вторичная обмотка:			
число витков	2 300+2 300	600+600	165
диаметр, *мм*, и тип провода	0,12 ПЭВ	0,15 ПЭВ	0,8 ПЭВ
Дополнительная обмотка:			
число витков	—	—	165
диаметр, *мм*, и тип провода	—	—	0,15 ПЭВ

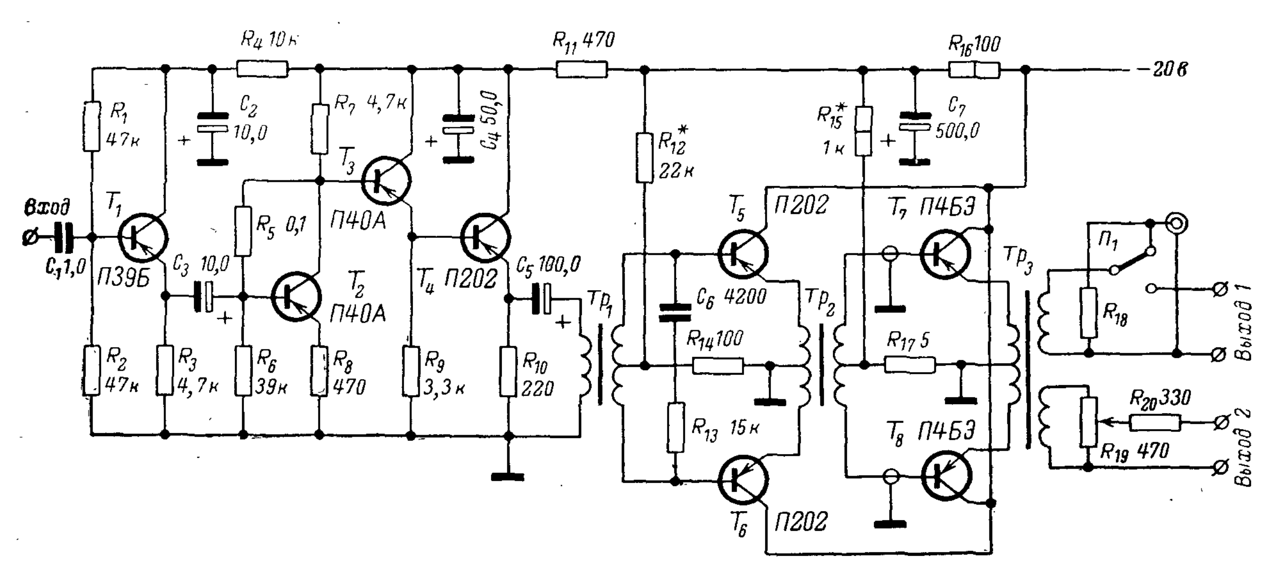


Рис. 59. Усилитель мощности для одноголосного ЭМИ.

обмотка (*Выход 2*) для подачи сигнала на вход дополнительных потребителей, например на линию безмикрофонной записи звука.

Регулировка усилителя сводится к подбору транзисторов выходных каскадов на симметрию и к установке начального смещения на базах триодов в этих каскадах, обеспечивающего минимальный уровень искажений типа «ступенька».

Данные трансформаторов усилителя, схема которого показана на рис. 59, сведены в табл. 6. Обязательное условие надежной работы усилителя заключается в обеспечении надлежащего теплоотвода для транзисторов выходного каскада.

ОСОБЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ГРОМКОГОВОРИТЕЛЯМ

К громкоговорителям ЭМИ вообще, одноголосных — в особенности предъявляются повышенные требования в отношении устойчивости против дребезгов и паразитных призвуков. Громкоговорители с сильным магнитным полем в зазоре звуковой катушки предпочтительны не только из-за более высокой отдачи, но и потому, что в них меньше переходные искажения, которые особенно неприятно проявляются в форме хлопков и щелчков при воспроизведении звуков с жестким амплитудным фронтом. Широкополосные громкоговорители далеко не во всех случаях оказываются лучшими, так как формирование мягких тембров, особенно в басовом регистре, затрудняется в случае применения широкополосных громкоговорителей необходимостью создавать фильтры с более глубоким подавлением высоких частот. Кроме того, воспроизведение мягких тембров широкополосными громкоговорителями нередко сопровождается шипящими призвуками, которые возникают в самом громкоговорителе, и поэтому никакими фильтрами в электрическом тракте их устранить нельзя. С другой стороны, поскольку уровень сигнала во всем тракте ЭМИ находится обычно много выше уровня шумов элементов схемы, если необходимо воспроизвести резкие или звонкие тембры, не представляет большого труда создать надлежащие условия формирования такого сигнала с запасом на высших частотах с тем, чтобы желательный эффект получить с помощью относительно узкополосных громкоговорителей.

По сумме изложенных требований так называемые нормализованные громкоговорители, выпускаемые промышленностью для радиоаппаратуры массового производства, как правило, не могут быть рекомендованы для применения в ЭМИ профессионального класса. Наиболее подходят в данном случае громкоговорители, выпускаемые заводами киноаппаратуры (в том числе для переносных звуковых киноустановок).

СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ

Требования к системам питания ЭМИ и любых других электронных устройств принципиально ничем не отличаются. Поскольку, как ясно из предыдущего, выходные усилители ЭМИ должны обладать сравнительно высокой мощностью, а наличие фона в паузе звучания для ЭМИ совершенно недопустимо, при конструировании питающих устройств необходимо позаботиться о надлежащей фильтрации выпрямленного напряжения. При этом следует учитывать, что фон может быть не только следствием недостаточной фильтрации, но и по-

являться в результате наводки магнитных полей силового трансформатора и дросселей на индуктивные элементы схемы ЭМИ, особенно на систему формантных контуров. Пульсации могут проявиться и в другой весьма неприятной форме, в виде наводки на элементы схемы ведущих генераторов, которая вызывает частотную модуляцию тонов на частоте питающей сети. Эта модуляция проявляется в звуке в виде хрипоты, весьма заметной даже при очень незначительной девиации частоты тона. Наконец, необходимо практически полностью исключить гудение трансформаторов выпрямителя.

Чтобы поддерживать стабильность частоты генераторов, к питающему устройству предъявляется требование стабильности выходного напряжения. Стабилизация напряжения питания весьма желательна и для всего ЭМИ в целом, особенно если он предназначается для частых перевозок, когда более вероятны случаи питания от нестабильных сетей. Такая общая стабилизация питания упрощает требования к режимам всех элементов схемы, в частности к режимам транзисторов. Для последних при этом все отклонения от оптимального режима определяются лишь температурными факторами, устранение влияния которых и обеспечение условий надежного действия ЭМИ весьма затруднительно.

Выбирая систему стабилизации напряжения, следует сразу же отбросить феррорезонансные стабилизаторы, недостатки которых особенно заметны при использовании в ЭМИ. Работа этих стабилизаторов почти неизбежно сопровождается гудением. У них отмечается повышенный уровень рассеянного магнитного поля и наличие в этом поле гармоник к основной частоте, легко создающих заметные наводки на индуктивные элементы схемы ЭМИ. Поэтому в случае ансамбля из нескольких ЭМИ стабилизатор одного инструмента может влиять на все остальные инструменты. Эти стабилизаторы имеют большой вес и объем и критичны к частоте питающей сети.

Поскольку в настоящее время применяются почти исключительно полупроводниковые схемы ЭМИ с низковольтным напряжением, наиболее целесообразным оказывается применение схем питания с полупроводниковыми фильтрами-стабилизаторами, которые обеспечивают высокое постоянство питающего напряжения при полном отсутствии индуктивных элементов (кроме собственно силового трансформатора). Условием нормальной работы таких схем является наличие запаса нестабилизированного выпрямленного напряжения, при котором нижняя граница его пульсации (при наименьшем значении напряжения питающей сети) будет все же выше уровня выходного напряжения на 1,5—2 *в*.

На рис. 60 приведена схема одного из возможных вариантов выпрямителя с полупроводниковым фильтром-стабилизатором на выходное напряжение 12,6 *в* при токе нагрузки до 0,8 *а*. Нестабильность напряжения на выходе такой схемы не превышает 0,05% на 10% входного. Пульсация не превышает 5 *мв*. Стабилизатор надежно работает при изменении напряжения сети от —20 до +10% номинального. Точное значение выходного напряжения устанавливается путем подбора величины сопротивления резистора R_6 или R_7. Необходимая величина выходной мощности в схеме обеспечивается применением двухкаскадного регулятора тока в нагрузке на транзисторах T_1 и T_2. Резистор R_5 в цепи эмиттера T_2 предохраняет этот транзистор при кратковременном коротком замыкании на выходе стабилизатора. Чтобы получить требуемую величину отпирающего смещения на базе транзистора T_1, необходимо использовать напряжение,

величина которого выше напряжения на его эмиттере, и следовательно, напряжения на выходной плюсовой шине. Такое повышенное напряжение задается со стабилитрона $Д_5$, имеющего самостоятельную цепь питания с выпрямительных диодов $Д_2$—$Д_3$ через фильтр C_3—R_1—C_4—R_2. В остальном схема соответствует известным схемам такого рода.

В выпрямителе, схема которого показана на рис. 60, применен трансформатор со следующими данными: сердечник Ш 25×25 *мм*; первичная обмотка (для номинального напряжения сети 220 *в*) со-

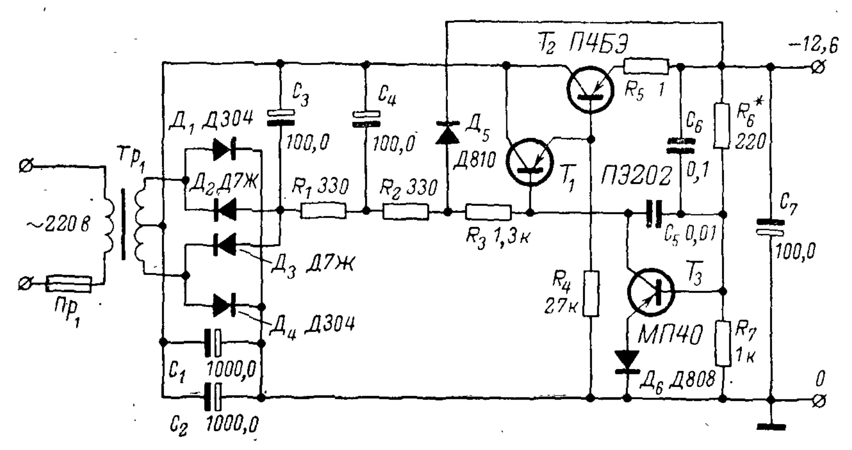


Рис. 60. Выпрямитель с фильтром-стабилизатором на 12,6 *в*, 0,8 а.

держит 2 150 витков проводом ПЭВ 0,25 *мм*; вторичная обмотка содержит две секции по 190 витков проводом ПЭВ 0,64 *мм*.

Транзистор T_2 должен быть вмонтирован в радиатор с расчетом отвода тепла при выделении мощности до 10 *вт*. Опорный стабилитрон $Д_6$ необходимо предельно изолировать от тепловыделяющих элементов схемы.

Глава восьмая

КОНСТРУКЦИИ МЕХАНИЧЕСКИХ БЛОКОВ ЭМИ

КЛАВИАТУРА И ПОДКЛАВИШНЫЕ МЕХАНИЗМЫ

Клавиатура — один из важнейших элементов конструкции ЭМИ, через который осуществляется контакт исполнителя со звуком.

Для многоголосных инструментов размеры клавиш (по всем трем измерениям) и глубина хода должны соответствовать клавиатуре фортепиано, наиболее распространенной, привычной для многих исполнителей и отработанной с учетом исполнения произведений любой виртуозности. В мелодических инструментах допустимо приме-

нять укороченные клавиши (белые 80—90 *мм*, черные 45—50 *мм*) и одновременно уменьшить их ширину из расчета протяженности октавы 156 вместо 165 *мм* по нормали на клавиатуру для фортепиано. При большем сокращении размеров клавиш быстрые пассажи исполнять неудобно.

Очень важная характеристика клавиатуры — усилие срабатывания клавиш — определяется действием подклавишных исполнительных механизмов, массой клавишных рычагов и упругостью возвратных пружин. С этой характеристикой тесно связана другая — предельная частота повторения ударов пальцев по клавише, определяющая так называемую репетиционную способность клавиатуры. Если клавиатура (в комплексе с подклавишными механизмами) сконструирована правильно, должна обеспечиваться повторяемость звуков на уровне 12—14 ударов в секунду, но во всяком случае не менее 10 ударов в секунду.

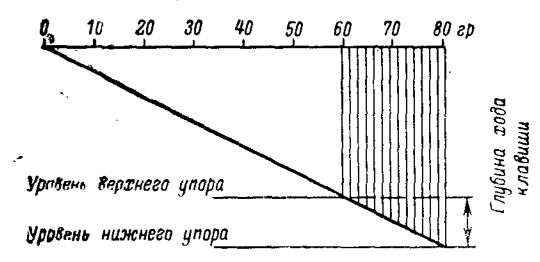


Рис. 61. Эпюра упругости клавиши.

Не следует задаваться целью осуществить клавиатуру, у которой усилие срабатывания клавиш, а также и глубина хода «стремятся к нулю». Такие клавиатуры не доставляют исполнителю ясного ощущения срабатывания, т. е. отклика, подтверждающего направленность и целесообразность его усилий. С другой стороны, чрезвычайно вредны (отвлекают, затрудняют пальцевые движения и утомляют) ощущения, связанные со слишком упругим или слишком глубоким ходом клавиш и вызываемые сопутствующим трением и вязкостью, которая появляется вследствие нарастания усилия по мере углубления клавиш. К сожалению, эффекты такого рода часто наблюдаются из-за наличия под клавишами контактных групп. Ощущаемая податливость клавиш должна носить целенаправленный характер, т. е. вызывать у исполнителя представление о связи усилий его пальцев с возникающими звуками.

В простейшем, пока наиболее распространенном случае акт срабатывания клавиш сводится к включению и выключению звука. При этом действуют, как правило, две силы: сила пусковых контактов (модулятора или непосредственно сигнала) и сила возвратной пружины клавишного рычага. Минимальная мера обеспечения удовлетворительного механического действия клавиш заключается в использовании такого устройства пусковых контактов и возвратных пружин, при котором усилие нажима в пределах рабочего хода клавиш (от состояния покоя до опускания на упор) менялось бы в пределах 60—80 *г*. Из этого следует, что пружина должна иметь пологую эпюру упругости со значительным начальным натягом на верхнем упоре клавишей (рис. 61). Все же ощущение упругости будет нарастаю-

щим, и в случае нескольких последовательно вступающих в действие контактов — ступенчатым. Если упругость контактных ламелей составляет значительную долю в суммарной упругости подклавишных элементов, ступенчатость усилия нажима будет создавать отвлекающие ощущения, кроме тех случаев, когда она введена специально как средство более сложного управления звуком (например, ступенчатое регулирование громкости). Однако в этом случае необходимо создать преднамеренно четкие (контрастные по ощущению) переходы от одного уровня упругости к другому, применяя промежуточные упоры соответствующих упругих элементов.

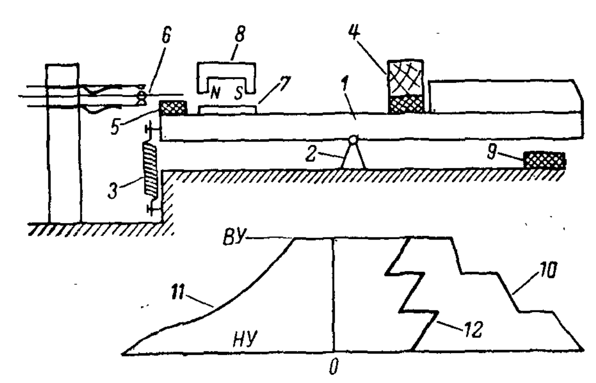


Рис. 62. Клавиатура с магнитной компенсацией упругости.

Весьма действенным средством улучшения характеристик клавиатуры и устранения избытка упругости подклавишной системы могут служить магнитные компенсаторы, действие которых ясно из рис. 62 *. Здесь клавишный рычаг *1* помещен на шарнире *2*. В состоянии покоя он подтянут пружиной *3* к верхнему упору *4*. На тыловом конце рычаг *1* снабжен толкателем *5* для контактной группы *6* с железным якорем *7* для магнита *8*. Если нажать на клавишу, она опускается на нижний упор *9* и толкателем *5* осуществляет переключение контактов группы *6*. В процессе опускания рычага происходит нарастание силы растяжения пружины *3* и ступенчатое нарастание сил от ламелей группы *6*. Одновременно сокращается магнитный зазор в системе якорь *7* — магнит *8*, что приводит к подтягиванию тылового конца рычага *1* вверх и, таким образом, к компенсации нарастания упругой реакции системы: пружина *3* — контактная группа *6*. Эффект компенсации иллюстрируется эпюрами на рис. 62, где кривая *10* представляет силу упругости пружин *3* и *6* в интервале движения клавишного рычага между верхним упором *ВУ* и нижним *НУ*, кривая *11* — силу магнитного притяжения системы *7—8* в том же интервале и кривая *12* — результирующую силу на конце клавишного рычага. Как видно из эпюр, нарастание усилия упругих подклавишных элементов может быть в целом устранено (не считая частных отклонений на отдельных участках пути). С помощью соответствую-

* Авторское свидетельство № 176.480.

щей регулировки магнитной системы *7—8* можно обеспечить и перекомпенсацию нарастания упругости, так что характеристика упругости клавиши получится в целом падающей. В этом режиме создаются благоприятные условия для ощущения «барьера» начальной упругости и легкости удержания клавиш в конечной позиции. Ощущение такого рода близко подходит к ощущению, возникающему на фортепианной клавиатуре, и ассоциируется с ударно-затухающим характером звука.

На рис. 63 показан фрагмент другой конструкции, поясняющий способ осуществления виброчувствительной клавиатуры (например, для применения в схеме рис. 23*), а также способ передачи нажимной или ударной команды от любой клавиши клавиатуры к общему датчику. Здесь клавишные рычаги *1*, *2* на своих тыловых концах имеют расширения, в которых закреплены пружины *3*, соединяющие клавишные рычаги при помощи накладок *4* с вертикальной стенкой *5* основания клавиатурного блока. Поскольку пружины *3* изогнуты под прямым углом к оси клавишных рычагов и имеют широкую базу, они обеспечивают вертикальное движение клавиш без каких-либо дополнительных направляющих и вместе с тем за счет небольшого скручивания своей вертикальной части (в зазоре между торцем клавишной пятки и накладкой *4*) допускают упругое боковое смещение клавиш в случае приложения к ним вибрационного усилия пальцев.

Если нажать на клавиши, они опускаются, как на упор, на рейку *6*, подвешенную на пружинах *7*, снабженных демпферами *8* (для наглядности на рисунке левая пружина и демпфер не показаны). Вибрирующие движения пальцев на нажатых клавишах вызывают их боковое смещение в обе стороны, от нейтрального положения. Это смещение передается рейке независимо от того, какая из клавишей в данный момент нажата. Рейка *6* совершает вибрирующее движение по своей продольной оси, передавая вибрацию электромеханическому преобразователю *9*, жестко укрепленному на основании клавиатуры *4* через поводок *10*, связанный с рейкой *6*. Поскольку частота вибрации достаточно низка, а масса рейки и связанной с ней клавиши относительно невелики, система безынерционно воспроизводит все вибрационные движения пальцев. При надлежащей чувствительности вибродатчика (т. е. преобразователя *9* и следующего за ним усилителя сигнала вибрации) необходимая сила вибрации в звуке может быть достигнута при боковом смещении клавишей на ± (0,2—0,3) *мм*.

На рис. 63 показана также промежуточная рейка *11*, концевые участки которой жестко соединены с осью *12*. Ось вращается в подшипниках *13*, закрепленных на основной рейке *6*. В состоянии покоя клавиш с помощью пружины *14* рейка *11* приподнята над рейкой *6* (на рис. 63 не показан упор, препятствующий чрезмерному подъему рейки *11*). Когда клавиши опускаются, они толкателями *15* прежде всего опускают рейку *11*, которая в нижнем положении вместе с клавишами ложится на верхнюю полку основной рейки *6*. Чтобы устранить стук соударения, на верхней полке рейки *6* должна быть наклеена демпфирующая прокладка.

Из описания конструкции должно быть ясно, что рейка *11* поворачивается при нажиме на любую клавишу независимо от того, находится ли нажатая клавиша посредине или на любом краю клавиатуры. Поэтому такое движение рейки *11* может быть использовано для приведения в действие пусковых контактов или какого-

* Авторское свидетельство № 126.354.

либо другого датчика, имеющего назначение передавать сигнал в схему инструмента при опускании любой клавиши. Кроме этого общего приемника, под каждой клавишей можно дополнительно разместить (в частности, в зазоре между толкателем *15* и рейкой *11* или в тыловой части клавишных рычагов) индивидуальные пусковые системы, например, для управления высотой тона.

Рейка *11* при отпускании клавиш должна иметь надлежащую скорость срабатывания. Для этого ее масса должна быть максимально ограничена, плечо оси 12 предельно сокращено, натяг пружины — наибольшим, возможным по условиям жесткости клавиатуры. Чтобы снизить усилия, необходимые для удержания рейки *11*

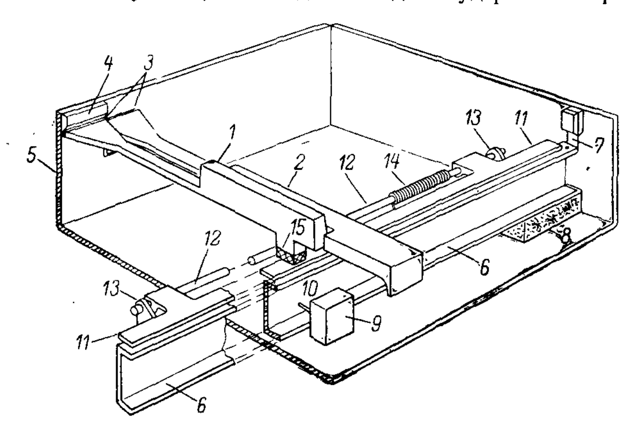


Рис. 63. Подклавишный приемник вибрации пальцев.

в нажатом положении, весьма желательно применить магнитный компенсатор, принцип действия которого описан в связи с рис. 62. В больших клавиатурах, включающих много октав с целью снижения инерционности или с целью получения различных характеристик управления по регистрам, рейка *11* и связанная с ней система может быть разделена на самостоятельные участки, примыкающие друг к другу по длине клавиатуры.

Следует особо подчеркнуть необходимость жесткой связи рейки *11* с осью *12* в обеих концевых точках. Если рейки *11* будет вращаться не с осью, а на оси *12*, то при нажатии клавиши на одном из концов рейки другой ее конец, подпертый возвратной пружиной, может остаться неподвижным (ввиду недостаточной жесткости рейки) и рабочий ход рейки в зоне связи с приемником ее поворота может оказаться недостаточным для срабатывания этого приемника.

При отработке конструкции клавишных и подклавишных систем следует особое внимание обращать на обеспечение бесшумности их работы. Шумы, возникающие при соударениях частей, лучше всего устранять, используя прокладки из фортепианного фильца. Шумы контактных групп устраняются с помощью звукоизолирующих капотов.

Другое важное требование, которое необходимо учитывать при конструировании клавиатур — это обеспечение безотказности и износоустойчивости. Следует иметь в виду, что предельные нагрузки клавиш при ударах пальцами и связанные с этим ускорения в подклавишных системах по крайней мере на порядок выше средних динамических и тем более статических нагрузок. За расчетную норму надежности для механизма каждой клавиши желательно принять 10^6 срабатываний на один отказ.

При общей компоновке ЭМИ надо обратить внимание на правильное расположение клавиатуры по высоте относительно пола. В последние годы по сравнению с предшествующими десятилетиями намечается тенденция, по крайней мере для пианино, снижать уровень клавиатуры над полом. Если используется стандартный стул (с высотой сидения над полом 430—440 *мм*), оптимальным можно считать расстояние между клавиатурой и полом (по плоскости белых клавиш) 700 *мм*. Для двухклавиатурных ЭМИ на этом уровне должна находиться нижняя клавиатура.

МАНИПУЛЯТОРЫ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ

По условиям компоновки, способу действия и приемам использования к клавиатурам ЭМИ примыкают различного рода переключатели, преимущественно клавишные. Эти переключатели можно разделить на две группы:

переключатели высокой оперативности (манипуляторы), действующие в связи с аппликатурой пальцев на основной клавиатуре, с нефиксирующимися и самофиксирующимися клавишами или рейками (например, клавиши или рейки октавного переноса диапазона коротких клавиатур);

переключатели предварительной установки того или иного параметра (например, установки тембра), с самофиксирующимися клавишами.

Граница деления переключателей по двум приведенным выше группам весьма условна, так как понятие «предварительной установки» не имеет простого количественного выражения. Если необходимо изменить тембр ЭМИ в процессе исполнения музыки, идеальным представляется режим мгновенного переключения (если речь не идет о плавной регулировке) и норму времени на предварительную установку приходится обосновывать не по музыкальным потребностям, а лишь по техническим возможностям конструкции. В связи с этим следует отметить, что применяемые довольно широко в настоящее время в зарубежных электроорганах многопозиционные плунжерные регуляторы гармонических составляющих звука, вопреки рекламе, отнюдь не наилучшим образом решают вопрос об изменении тембра звука, если рассматривать такое решение с позиций музыканта-исполнителя.

Переключатели типа манипуляторов нужно располагать в непосредственной близости от клавиатуры. С точки зрения музыканта они должны составлять с ней органическое целое. Одной из форм выполнения манипуляторов может быть манипулятор в виде продолжения клавиатуры, клавиши которого отличаются по цвету от клавиш основной клавиатуры. Важна такая характеристика манипуляторов, как усилие срабатывания, которое по легкости должно соответствовать усилию для клавиш основной клавиатуры. Необходимо также обеспечить бесшумность действия манипулятора.

Для переключателей предварительной установки в принципе могут быть использованы механизмы по типу клавишных переключателей радиол и магнитофонов. Однако при этом следует принять меры к резкому сокращению переключающего усилия и стуков, особенно стуков освобожденных толкателей при ударе их по упору исходного положения. Практически выполнение этих требований приводит к значительной модификации конструкции с применением легких фиксирующих систем, неметаллических толкателей, фильцевых упоров, контактных систем с нетрущимися контактами и т. п. Поскольку в ряде случаев (например, для переключения тембров)

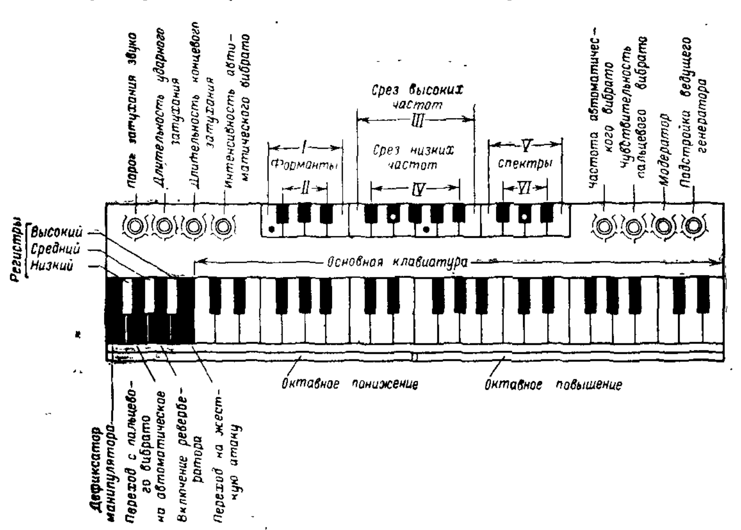


Рис. 64. Компоновка клавиатурной панели ЭМИ («Экводин», перспективная модель).

переключатели могут содержать значительно больше клавиш, чем это имеет место в переключателях радиол и подобных им устройств, представляется целесообразным выполнять клавиши в характерном сочетании, создающем «читаемость» клавиатуры и возможность записи простого или комбинированного включения в нотах.

В качестве одного из возможных примеров компоновки клавиатурно-коммутационной панели ЭМИ на рис. 64 приведена панель инструмента «Экводин» (проектируемая модель) с обозначением функций входящих в ее состав элементов. Показанный здесь переключатель тембров имеет функциональные группы клавиш (с I по VI включительно), позволяющие применять различные комбинации и соединения, относящиеся к формантам, фильтрам полосы и спектральному составу звука. Общее количество таких комбинаций составляет 1 470. Группам присвоены номера в порядке черных и белых клавиш:

$$\frac{\text{II}}{\text{I}};\ \frac{\text{IV}}{\text{III}};\ \frac{\text{VI}}{\text{V}}$$

Деление на группы I, II и V, VI — условное, так как функционально они в парах дополняют друг друга. Разбивка клавиш на группы позволяет записывать комбинации включения по нормам клавиш, входящих в группу, считая их номера слева направо в пределах данной группы, и помечать такое включение в нотах. Например, для клавиш переключателя, помеченных на рис. 64 кружком, запись включения будет выглядеть так:

$$\frac{-}{1};\ \frac{2}{4};\ \frac{2}{-}.$$

В верхней части ЭМИ помимо клавиатурно-коммутационной панели целесообразно предусматривать:

пульт для нот (пюпитр);

звуковой блок малой мощности (1—2 *вт*) для самоконтроля исполнителя в условиях большого ансамбля или для репетиционной работы;

индикатор включения инструмента;

индикаторы положения ножных регуляторов.

НОЖНЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ

Специфическую часть конструкции ЭМИ представляют ножные регуляторы звуковых параметров, которые можно разделить на три следующие группы:

регуляторы с приводом от коленных рычагов;

регуляторы педальные (действующие от ступней ног);

ножные клавиатуры.

В двух первых группах применяются ступенчатые регуляторы и регуляторы плавного действия. Исполнительские функции таких регуляторов весьма различны — в зависимости от типа ЭМИ, его конкретного предназначения и обоснования исполнительской техники. По сравнению с коленными рычагами педальные регуляторы значительно более подвижны и точны, в связи с чем на них можно возложить более ответственные и более тонкие функции управления звуком. Но применение педальных регуляторов отнюдь не исключает одновременного использования коленных рычагов. С другой стороны, сами педальные механизмы, как будет показано ниже, могут быть сделаны многофункциональными. Таким образом, управление звуками с помощью движения ног может быть довольно разносторонним и существенно дополнять пальцевую технику.

Третья группа — ножные клавиатуры — представляет собой специфическое дополнение ручных клавиатур в системах сложных орга́нов. Ножные клавиатуры требуют относительной свободы движения ног и, таким образом, ограничивают число и гибкость применения других ножных регуляторов.

Особую группу ножных регуляторов представляют собой педальные тумблеры с попеременным циклом: «включено — выключено».

Общий недостаток ножных регуляторов заключается в том, что их наличие делает всю конструкцию ЭМИ более громоздкой, привязывает ее к стационарной форме и затрудняет деление на функциональные блоки, удобные для транспортирования. Тем не менее трудно представить ЭМИ с высокой выразительностью звучания

(исполнительской техники), в котором все тонкости выражения, связанные с вариацией разнообразных звуковых характеристик, можно было бы получить только на базе пальцевой техники. Во всяком случае, такое соблазнительное по изяществу решение может появиться лишь в результате весьма настойчивой и проникновенной работы специально в данной области, основанной на весьма квалифицированном совмещении инженерной, музыкально-теоретической и музыкально-исполнительской квалификации.

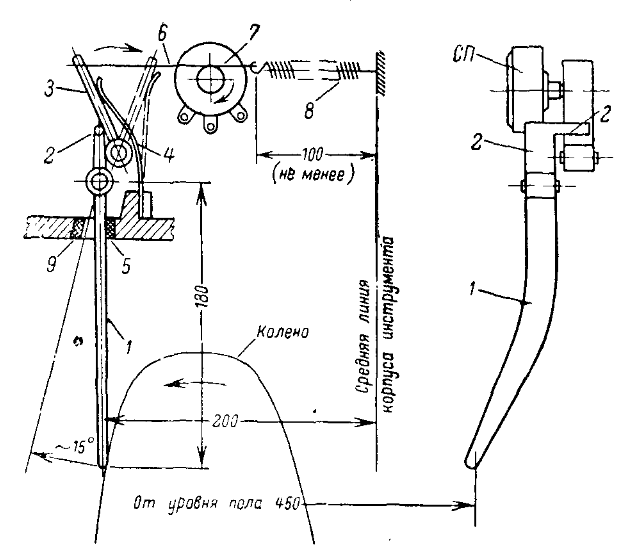


Рис. 65. Конструкция коленного механизма.

Для конструкции современного легкого стиля желательно либо применять коленные рычаги без использования более громоздких педальных регуляторов, либо подсоединять относительно миниатюрные автономные педальные блоки, которые устанавливаются под инструментом на полу. В последнем случае необходимо позаботиться о том, чтобы соединительные провода, столь милые сердцу электриков, но нисколько не импонирующие музыкантам, были по возможности малозаметны, обеспечивали короткую и изящную укладку, а также о том, чтобы создать возможность удобного, быстрого и надежного соединения и разъема педального блока с собственно инструментом.

На рис. 65 показана конструктивная схема привода коленного рычага (под левое колено исполнителя) к исполнительскому элементу, который условно показан в форме потенциометра типа СП-1. Коленный рычаг *1* на своем тыловом конце имеет скругленный толкатель *2*, которым приводит в действие промежуточный рычаг *3* (трансформирующий угол отклонения). Рычаг *3* оказывает упругое давление на рычаг *1* с помощью пружины *4*, стремясь удерживать его на упоре *5*. Рабочее усилие на переднем конце коленного рычага *1* для четкого ощущения его сдвига должно изменяться от

0,5—0,8 *кГ* для начального положения до 1,2—1,5 *кГ* для конечного положения.

На конце рычага *3* закреплен тросик *6*, обернутый вокруг шкива *7* на оси *СП* и натянутый пружиной *8* с весьма пологой характеристикой упругости, обеспечивающей момент вращения шкива *7* на уровне 0,7—1,0 *кг·см*. При нажиме коленом на рычаг *1* конец рычага *3*, преодолевая давление пружины *4*, перемещается вправо. Пружина *8*, подтягивая тросик *6*, прокручивает шкив *7* по часовой стрелке. При диаметре шкива *7* около 12 *мм* обеспечивается поворот оси *СП* на 250° (если выдержаны указанные на рис. 65 соотношения длины рычагов и соотношение центров их поворота). В положении предельного отклонения рычаг *1* встречает упор *9*. Поскольку усилие прижима рычага *1* к упору *9* может быть значительно больше необходимого для действия механизма, следует предусматривать приблизительно десятикратный запас прочности для рычага *1*, крепления его оси вращения и для упора *9*.

Чтобы обеспечить скольжение коленного рычага по колену, он должен иметь гладкую поверхность и быть отполирован.

В том случае, когда коленный рычаг предназначается для переключения какой-либо цепи с помощью контактной группы, а не для плавного регулирования, конструкция его значительно упрощается: промежуточный рычаг *3* ввиду малости необходимого рабочего хода устраняют, пружину *4* выполняют таким образом, чтобы ее усилие прикладывалось непосредственно к рычагу *1*; приемник давления контактной группы подводят под толкатель *2*, используя изоляционную прокладку.

Конструкция педальных механизмов должна обеспечить четкость ощущения позиции педали по отношению к степени нажатия. Это достигается определенной зависимостью усилия нажатия от угла поворота педальной платформы. Чтобы повысить точность ориентации, может оказаться целесообразным в ряде случаев на оси педали ввести сектор с одной или несколькими поперечными засечками и подпружиненный ролик, скользящий по поверхности такого сектора. Когда ролик частично западает в засечки сектора, получается четкое ощущение достигнутой позиции нажима, которое в общем не будет противоречить ощущению плавного движения педали.

Когда музыкант-исполнитель пользуется стандартным стулом, положение ступни его ноги на педали должно по возможности быть низким. Лучше всего, если каблук будет упираться непосредственно в пол.

На рис. 66 показан один из возможных вариантов конструкции педального механизма с упруго возвратным ходом. Педальная накладка *1*, выполненная из полированной латуни или хромированной стали, с помощью щечек *2* вращается на полуосях *3*, закрепленных в корпусе инструмента. К одной из щечек *2* шарнирно прикреплена промежуточная тяга *4*, связанная с основной тягой *5*. Последняя с помощью пружины *6* подтянута вверх и покоится на упоре *7*. В верхней части тяга *5* имеет реечное сцепление с трипкой *8*, закрепленной на оси исполнительного регулятора, входящего в схему ЭМИ. При нажиме на педаль пружина *6* дополнительно растягивается и тяга *5* движется вниз, что приводит в действие исполнительный регулятор. Педальная накладка *1* имеет резиновую прокладку *9* в качестве концевого упора.

Предварительное натяжение пружины *6*, приведенное к точке контакта ноги с педальной накладкой *1*, должно быть в пределах 1,5—2,5 *кГ*, конечное усилие нажима педали — на 50% больше начального. Детали конструкции механизма должны обеспечивать плавность, бесшумность хода и отсутствие инерции и трения при возвратном ходе. В инструменте может быть применен агрегат из двух педалей, расположенных симметрично относительно вертикальной оси инструмента с независимыми приводами к различным исполнительным механизмам.

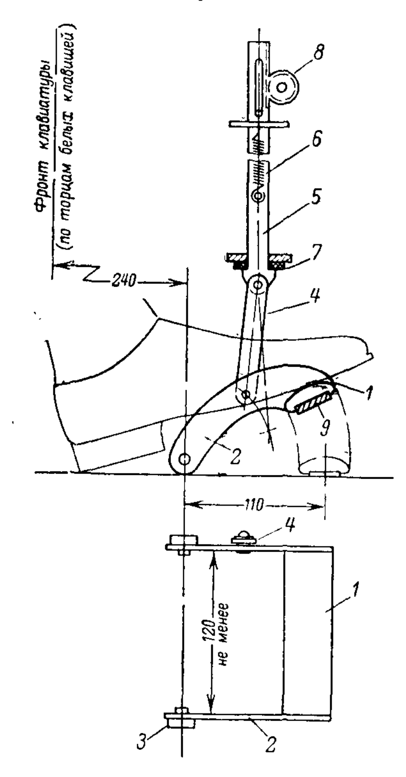


Рис. 66. Конструкция педального механизма с упруго возвратным ходом.

Важное условие гибкого управления педалями заключается в их правильной ориентации относительно фронта (торцов белых клавиш) клавиатуры по глубине в соответствии с размерами, приведенными на рис. 66.

На рис. 67 показан другой тип педального механизма с неупругим сдвигом платформ, предназначенный для регулирования одной ногой независимо и одновременно двух различных параметров звука[1]. В данном конкретном конструктивном варианте механизм наиболее пригоден в органах с ножной клавиатурой, когда ноги исполнителя только периодически освобождаются для педального управления. Такой механизм должен размещаться выше и глубже в корпусе инструмента, чем механизм, описанный в связи с рис. 66, с учетом переноса ног с клавиатуры на педаль и обратно. Однако не исключена возможность использования аналогичного механизма и как самостоятельного напольного блока. В этом случае его конструкция должна быть достаточно миниатюрной и иметь законченную художественную форму, чтобы блок не производил громоздкого впечатления.

Механизм, схема которого приведена на рис. 67, состоит из платформы *1*, вращающейся с осью *2* в подшипниках основания *3*. На оси *2* закреплен шкив *4*, от которого осуществлен привод к регулятору *5*. На подпятнике *6* платформы установлена собственно педальная накладка *7*, которая может при соответствующем движении ноги отклоняться от продольного среднего положения влево

---

[1] Авторское свидетельство № 130.333.

и вправо на некоторый угол (около ±20°). На нижнем конце оси подпятника *6* закреплен шкив *8*, от которого осуществлен привод к регулятору *9*. Очевидно, что воздействие ноги на положение последнего регулятора не зависит от вертикального наклона педали, и, таким образом, оба регулятора могут быть установлены в любое необходимое положение независимо друг от друга движением ступни ноги в горизонтальном и вертикальном направлениях.

Конструкция данной схемы механизма может иметь много различных вариантов, и выбор конкретного варианта определяется конструкцией ЭМИ в целом. В любом конструктивном варианте имеется одна обязательная деталь, не показанная на рис. 67, — ограничительные упоры вертикального и горизонтального ходов, предохраняющие от перегрузки регуляторы в их крайних положениях.

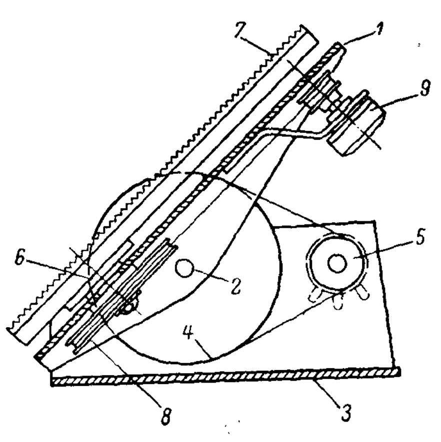


Рис. 67. Двухфункциональный педальный механизм.

Для двух ног можно применить два описанных механизма, которые будут выполнять программу по четырем параметрам, например, следующим образом:

а) правая педаль: по вертикали — общая громкость звука, по горизонтали — баланс громкости по клавиатурам;

б) левая педаль: по вертикали — тембр (полоса частот), по горизонтали — интенсивность вибрации.

Другую группу педальных механизмов представляют ножные манипуляторы, предназначенные для включения или переключения каких-либо цепей. С учетом изложенных выше требований к ручным клавиатурным манипуляторам и описанным конструкциям педалей останавливаться здесь подробно на конструкции этих манипуляторов нет смысла.

Представляет определенный интерес сочетание педальных регуляторов плавного действия с педальными включателями и переключателями на основе конструкции механизма, приведенной на рис. 67. При этом, как, впрочем, и во всех случаях комбинированного управления двойным движением ноги, более ответственные функции управления следует предназначать для вертикального движения ноги (более гибкого и тонко развитого), а для горизонтального движения — менее ответственные функции с допустимой пониженной точностью, менее подвижные и реже используемые.

ВОПРОСЫ ОБЩЕЙ КОМПОНОВКИ

Конструкцию составляющих ЭМИ блоков следует выбирать, исходя из требований к их весу, габаритам и с учетом архитектурной формы инструмента в целом.

Требование транспортабельности приводит к необходимости предельного снижения веса ЭМИ и обеспечения удобства переноса и перевозки их обычными транспортными средствами, если не целиком, то в виде отдельных блоков. По габаритам, весу и форме такие блоки должны отвечать существующим в практике нормам для транспортабельного багажа и одновременно отвечать изящным формам традиционных музыкальных инструментов.

Чтобы предохранить блоки при транспортировке, их необходимо перевозить и хранить в упаковке. Таким образом, в основном приходится ориентироваться на блоки, переносимые и перевозимые в футлярах, чемоданах или чехлах.

В отношении веса блоков желательно ограничиваться уровнем 5—8 *кг*, но во всяком случае не более 20 *кг*, с тем, чтобы обеспечить ручную переноску на короткие расстояния и перевозку городским транспортом. Более тяжелые блоки, как правило, и более громоздкие — это уже багаж, требующий специальных условий перевозки с участием вспомогательного персонала. Обычно ЭМИ может состоять из двух, но не более чем из трех блоков, так как при большем числе блоков перевозка опять-таки будет специальной.

Значительный выигрыш в весе блоков получается в случае их цельнометаллической конструкции, когда хорошо продуманная оболочка блока представляет одновременно и несущую конструкцию для внутренних частей. В этом случае появляется также возможность использовать наружные металлические поверхности блока и массу металла в качестве теплоотводящих и теплорассеивающих элементов для мощных транзисторов. Правда, при цельнометаллической конструкции несколько осложняются вопросы декоративной отделки видимых частей (поверхностей). Кроме того, тонколистовая обшивка блоков неустойчива к ударным воздействиям. Однако, имея навыки художественного конструирования и при надлежащей отработке конструкции на макетах, эти трудности можно обойти.

В отношении габаритов предпочтительны блоки с контрастно различающейся высотой, шириной и глубиной. Плоские блоки удобнее в транспортировке и производят более легкое внешнее впечатление. С позиций удобства перевозки за основу можно принять соотношения, выработанные для чемоданов современных пропорций.

Гораздо сложнее обосновать форму и внешний вид блоков в зависимости от функционального назначения. ЭМИ, собранный из двух и более блоков, должен производить законченное впечатление как архитектурное и конструктивное целое, отвечать требованиям удобства для исполнителя-музыканта, обладать устойчивостью, сохраняя легкость и изящность силуэта. Впечатления легкости воспринимаемой формы можно достигнуть удачным членением контура и плоскостей по цвету и фактуре материалов, а также за счет применения специальных элементов художественной конструкции. Деревянные корпуса и обшивки следует применять только для стационарных конструкций, частая перевозка которых не предполагается.

Необходимо обеспечить эксплуатационную разборку и сборку блоков ЭМИ без применения вспомогательных средств (отверток, ключей и т. п.). Соединительные элементы конструкции должны быть доступны в процессе сборки и разборки, но не должны обращать на себя внимание в собранном инструменте. Соединения должны быть плотными, исключающими люфты и нарушения положений составляющих ЭМИ частей при передвижении или переноске его как целого в пределах помещения концертного зала или на эстраде.

В блоках, содержащих акустические системы, следует обращать особое внимание на отсутствие вибрирующих частей и неплотных механических контактов, вызывающих дребезги, особенно заметные на фоне звуков глухого тембра.

Если ЭМИ состоит из нескольких механически автономных блоков, электрическое соединение их должно выполняться минимальным количеством вполне гибких кабелей в гладких цилиндрических рубашках темного, неяркого цвета. Ввод сети (самостоятельный) должен быть только в одном из таких блоков, наиболее удаленном от аудитории. На эстраде кабели должны быть уложены по возможности незаметно при взгляде из зала и не должны мешать передвижению людей на эстраде.

Художественное конструирование ЭМИ в целом представляет весьма важную проблему, на которую необходимо обращать серьезное внимание. Приходится констатировать, что внешние формы ЭМИ, по крайней мере тех, которые выпускаются в настоящее время, несколько статичны и не доставляют слушателям (являющимся часто одновременно и зрителями) тех впечатлений, которые вызывают различные классические инструменты, хотя, если разобраться хорошенько, эта привлекательность формы классических инструментов, как правило, идет за счет удобства их исполнительской техники. Практически все ЭМИ мыслятся как инструменты клавишные, и процесс исполнения на них, особенно в специфическом («электронном») ансамбле, не обнаруживает тех внешних признаков действия, которые невольно приковывают интерес аудитории в симфоническом или эстрадном ансамбле.

Было бы большой ошибкой отягощать внешнюю форму ЭМИ такими броскими элементами, которые не отвечали бы их функциональному содержанию и тем более приводили бы к использованию особых исполнительских приемов ради внешнего зрительного эффекта. Однако элементы динамичности и легкости формы, ее функционально целесообразные признаки должны быть найдены и тщательно выполнены. Инертность в поиске формы инструмента столь же губительна, как и безвкусица украшательства.

К технической части конструкции подходит большинство известных рекомендаций для любой другой радиоэлектронной аппаратуры. Поскольку ЭМИ, как правило, эксплуатируются технически неквалифицированным персоналом, а при частых перевозках могут иметь место весьма неблагоприятные механические и климатические перегрузки, необходимо обращать серьезное внимание на простоту эксплуатации, безотказность, долговременную надежность и работоспособность инструментов.

При создании серийно-способных ЭМИ, естественно, должно быть уделено соответствующее внимание технологичности изготовления деталей, узлов и блоков, обеспечению возможности применения объективных методов регулировки и проверки. Две важнейшие характеристики ЭМИ определяют обоснованность их промышленного производства, как и любого другого изделия товарного значения: стоимость при рентабельном производстве и гарантии по безотказной эксплуатации. Следует, кстати, добавить, что при создании ЭМИ товарного значения должен быть решен вопрос о комплектации изделий инструкциями по технической эксплуатации, а также методическими указаниями по музыкально-исполнительской технике, отражающими специфические особенности и возможности данного ЭМИ.

Глава девятая

ПОРЯДОК КОНСТРУИРОВАНИЯ ЭМИ

Для успешного создания нового ЭМИ прежде всего необходимо разработать техническое задание на разработку или технические требования. Технические требования нужно сформулировать даже тогда, когда работа делается в качестве личного творческого поиска, так как такая формулировка позволяет на самой ранней стадии работы осмыслить возможный ее результат и практическое значение, а также заранее устранить возможные противоречия между различными требованиями (например, противоречия между сложностью устройства и возможной стоимостью работ, между музыкально-техническими и эксплуатационными требованиями и т. п.). Для этого, конечно, технические требования должны охватывать все стороны разработки независимо от того, имеется ли в виду создать самый простой или самый сложный ЭМИ.

ГРУППЫ ХАРАКТЕРИСТИК

Характеристики ЭМИ можно разбить на четыре группы, каждая из которых охватывает некоторую сумму проблем, определяющих основные направления разработки и находящихся во взаимодействии с проблемами других групп.

Первую группу составляют характеристики звуковой структуры или собственно звука. Сюда относятся:

звуковысотный диапазон ЭМИ;

структурные признаки спектра (или спектров, если предусматривается их переключение и соединение);

характеристики фильтров среза высших и низших частот и на их основе — варианты характеристик полосовых фильтров;

характеристики формантных фильтров (состав и взаимоотношение формант, их физические параметры, количество вариантов);

характеристики схем формирования амплитудной огибающей, включая схемы раздельного управления амплитудными функциями в каналах с различными частотными характеристиками и использование шумовых компонентов;

автоматическая (для мелодических ЭМИ) или дискретно-полутоновая (для многоголосных ЭМИ) коррекция спектральных, полосовых и других характеристик, связанных с переменными параметрами (высота, громкость звука);

виды и характеристики вибрато;

особые звуковые признаки или эффекты (реверберация, пространственное звучание, эффект унисона и т. п.);

диапазоны уровней интенсивности звука (громкости).

Практически все перечисленные характеристики (как и приводимые ниже характеристики других групп) расшифровываются материалами, изложенными в предшествующих главах.

Характеристики первой группы непосредственно связаны с характеристиками второй группы, которые относятся к средствам контакта музыканта-исполнителя со звуком или, иначе говоря, к исполнительским характеристикам. Сюда входят:

состав и принцип действия средств формирования мелодического рисунка (для мелодических ЭМИ). Исполнительские средства применения вибрато и глиссандо (для ЭМИ всех типов);

средства ударного (пальцевого) управления громкостью, управление звуковыми характеристиками посредством подклавишных датчиков вообще;

нажимные (преимущественно педальные) средства управления громкостью и системы педального управления в целом, включая коленные рычаги;

средства переключения и плавной нюансировки тембра, внешняя компоновка тембровых переключателей в зависимости от заданного состава и набора тембров;

состав и конструкция клавишных манипуляторов и других вспомогательных органов управления звуком, особенно средств управления переходными процессами.

Эти первые две группы характеристик охватывают, если можно так сказать, «музыкальную» конструкцию ЭМИ, в то время как две следующие (третья и четвертая) группы — его инженерную конструкцию.

В третью группу входят характеристики и признаки функциональной и электрической схем, вытекающие в основном из выбранного состава звуковых характеристик:

состав средств и схемы, обеспечивающие звуковысотный диапазон, включая средства настройки и специальные схемы стабилизации;

схемы вибрато и их взаимодействие со схемами генерирования звуков;

темброформирующие схемы (спектры, полосовые и формантные фильтры), схемы коммутации при изменении тембра;

схемы формирования амплитудной огибающей, пусковые схемы и схемы ударного управления громкостью;

схемы нажимного регулирования громкости;

структура и схемы расчленения диапазона на регистры или частные каналы для независимой или связанной вариации тембра, громкости и других характеристик;

специальные схемы формирования сложных переходных процессов;

другие специальные и вспомогательные схемы;

выходные усилители с учетом акустических систем;

схемы питания и стабилизации напряжений.

В четвертую группу входят характеристики, относящиеся к конструкции инструмента, которые в случае промышленного производства обычно тесно связаны с технологическими характеристиками:

конструкция клавиатуры, особенно в связи с конструкцией подклавишных контактных систем, датчиков управляющих сигналов и средств полутоновой настройки;

конструкция педальных и других ножных механизмов, включая связанные с ними исполнительные механизмы (регуляторы уровня громкости, глиссандо, вибрато и т. п.);

конструкция тембровых переключателей и регуляторов;

конструкция специальных манипуляторов и вспомогательных органов управления звуком;

характеристики конструкции, обеспечивающие требуемую износоустойчивость, особенно относящиеся к клавиатурам и подклавишным механизмам;

эргономические и экономические характеристики общей конструкции и отдельных блоков, межблочные связи и соединения;

разборность конструкции (транспортабельность), чехлы и упаковки.

Третью и четвертую группы характеристик связывают требования:

а) относящиеся к условиям эксплуатации (климатические требования, транспортабельность, ремонтоспособность и др.);

б) определяющие возможный уровень миниатюризации внутренних элементов и ресурсы надежности в зависимости от допустимой стоимости конструкции и ее сложности;

в) предусматривающие использование в конструкции стандартных и нормализованных элементов и блоков.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭМИ ПО КЛАССАМ

Разумеется, фактический состав и уровень перечисленных выше характеристик будет значительно различаться в зависимости от назначения ЭМИ и класса его исполнения. Ниже приводятся примерные характеристики для двух основных групп ЭМИ, многоголосных и мелодических, по классам. В основу классификации положен принцип соответствия возможностей ЭМИ музыке различного уровня сложности и художественного значения. При этом учтено и неизбежное повышение технической сложности инструмента по мере повышения его музыкального класса.

Для определения классов ЭМИ могут быть предложены следующие качественные уровни.

Высший класс: инструменты для исполнителей высокого профессионального уровня музыки любого жанра без ограничений по уровню выразительных средств сравнительно с уровнем, отвечающим классическим традициям. Предназначаются для применения в условиях концертного зала, театра или студии звукозаписи, преимущественно «соло».

I класс: инструменты для исполнителей профессионального уровня музыки любого жанра с несущественными ограничениями в выразительных средствах. Предназначаются для применения в условиях концертного зала, театра или студии, преимущественно в ансамбле с другими инструментами.

II класс: инструменты для исполнителей профессионального и высокого самодеятельного уровня музыки любого жанра в ансамблях. Предназначаются для применения в условиях различных эстрадных площадок, клубов и домашней самодеятельности.

К этому же классу следует отнести и узко специальные (оркестровые) инструменты профессионального значения.

III класс: инструменты для исполнителей начального профессионального и среднего самодеятельного уровня. Предназначаются для применения в условиях клубной самодеятельности, начального музыкального воспитания и индивидуальной музыкальной самодеятельности.

IV класс: инструменты-игрушки и ЭМИ с узко ограниченными музыкальными функциями, не предназначенные для профессионального использования.

Приведенные выше классы ЭМИ определяются по музыкальному уровню и непосредственно технический класс разработки не определяют. Так, можно считать, что ЭМИ II и даже I классов могут

Таблица 7

Основные характеристики многоголосных ЭМИ по классам

Характеристика	Класс				
	Высший	I	II	III	IV
Диапазон (октав)					
а) по звучанию, не менее	7,25	6	5	4	—
б) по клавиатуре, не менее	7,25	5	4	3	—
Погрешность настройки суммарно, от действия всех дестабилизирующих факторов, в % к частоте тона, не более	0,05 или до 0,15 при введении вибрато	0,1 или до 0,3 при введении вибрато	0,2 или до 0,5 при введении глиссандо	0,3 или до 0,8 при введении глиссандо	0,5 (глиссандо не предусматривается)
Сохранение настройки в пределах п. 2, сутки, не менее	30	15	10	5	3
Форма управления громкостью звуков	Пальцевое ударное, индивидуально для каждой клавиши с дополнительным управлением общим уровнем педалью или модератором	Пальцевое, индивидуально для каждой клавиши или общее педальное с возможностью индивидуального выделения мелодии или группы голосов	Общее педальное управление с возможностью выделения мелодического голоса	Общее педальное управление	Общее управление

Продолжение табл. 7

Характеристика	Класс				
	Высший	I	II	III	IV
Пределы вариации громкости, *дб*, не менее	60	50	40	30	30
Полная выходная мощность, *вт*, не менее	100	60	30	15	—
Уровень фона паузы, *дб*, не более	—70	—60	—60	—50	—50
Средства формирования переходных процессов	Сложные (спектральио-переменные) функции атаки и затухания	Мягкая и жесткая атака, плавиая отсечка звука	Смягчеиная атака и плавная отсечка звука	—	—
Комбинаций тембров, не менее	Не нормируется (допустим однотембровый вариант)	Не нормируется (допустим вариант ограниченного числа тембровых оттенков)	10 четко различимых	5	2
Педаль задержки и демпфирования звуков в режиме затухания	Обязательна	Обязательна	Необязательна	—	—

Продолжение табл. 7

Характеристика	Класс				
	Высший	I	II	III	IV
Подвижность клавиш, ударов в секунду, не менее	14	12	10	8	6
Износоустойчивость клавиатуры, срабатываний на 1 отказ	10^6	$3\cdot10^5$	10^5	$3\cdot10^4$	10^4
Режим эксплуатации:					
а) нанбольшая рабочая внешняя температура, °C	+40	+35	+35	+35	+30
б) наименьшая рабочая внешняя температура, °C	+10	0	0	0	+10
в) низшая допустимая температура при перевозках, °C	—40	—40	—40	—40	—20
г) допустимая относительная влажность при температуре +20°, %, не более	95	98	98	98	85
Вес комплекта, *кг*, не более	Не ограничивается	120	80	50	—
Конструкция	Стационарная	Разборно-транспортабельная	Разборно-транспортабельная	Транспортабельная	—

Таблица 8

Основные характеристики мелодических ЭМИ по классам

Характеристика	Класс				
	Высший	I	II	III	IV
Диапазон (октав): по звучанию, не менее	6	7,33	6,33	4,33	—
по клавиатуре, не менее	4	3,33	3,33	—	—
Число голосов	2 и более	1 или 2	1	1	1
Погрешность настройки, % к частоте, не более ±	0,2	0,3	0,5	0,5	0,7
Частотные вибрато	Пальцевое и автоматическое с регулируемой частотой и интенсивностью	Пальцевое и автоматическое с регулируемой частотой и интенсивностью	Пальцевое и автоматическое с регулируемой интенсивностью	Автоматическое	2
Средства плавного перехода по высоте	Обязательны в полном диапазоне клавиатуры с широкой вариацией по скорости	Обязательны в полном диапазоне клавиатуры с широкой вариацией по скорости	Обязательны в диапазоне не менее квинты	Обязательны в диапазоне не менее терции	Не обязательны

Продолжение табл. 8

Характеристика	Класс				
	Высший	I	II	III	IV
Средства свободной интонации	Обязательны (ограниченно)	Не обязательны	—	—	—
Управление громкостью	Пальцевое и педальное	Пальцевое и педальное	Педальное (пальцевое не обязательно)	Педальное	—
Пределы управления громкостью, *дб*, не менее	60	50	50	40	30
Средства формирования переходных процессов в начале и конце звука	Обязательны со сложной структурой	Обязательны со структурой, основанной не менее, чем на двух спектральных компонентах	Обязательны с простой структурой (без вариации спектра)	Обязательны с простой структурой (ограниченно)	—
Количество четко различимых тембров, не менее	Не нормируется (допускается однотембровый вариант)	30 — для одноголосных 15 — для двухголосных	20	10 — для стационарных; 3 — для переносных с автономным питанием	3

Продолжение табл. 8

Характеристика	Класс				
	Высший	I	II	III	IV
Средства тембровой ньюансировки	Обязательны в исполнительски гибкой форме	Обязательны в исполнительски гибкой форме	Обязательны в исполнительской форме	Обязательны	—
Полная выходная мощность, *вт* не менее	30	20	10	5	—
Фон паузы, *дб*, не более	—70	—60	—60	—50	—50
Износоустойчивость, число срабатываний на 1 отказ, не менее:					
для подклавишных механизмов	3 000 000	1 000 000	300 000	100 000	30 000
для тембровых и других переключателей	10 000	30 000	20 000	10 000	5 000
Конструкция	Разборно-транспортабельная	Разборно-транспортабельная	Разборно-транспортабельная	Транспортабельная	—

быть доступны для выполнения не только профессиональным конструкторам, но и высококвалифицированным радиолюбителям при условии надлежащего понимания ими музыкальных характеристик инструментов такого класса или при консультации конструктора с музыкальными специалистами на всех этапах выполнения и отладки ЭМИ. Инструменты высшего класса полноценно могут быть созданы только усилиями квалифицированного коллектива конструкторов при наличии надлежащей лабораторной базы и постоянного музыкально-технического руководства со стороны высококвалифицированных специалистов.

Основные характеристики инструментов многоголосной группы в соответствии с приведенными выше классами сведены в табл. 7; основные характеристики инструментов мелодической группы — в табл. 8. Электрические характеристики ЭМИ, не приведенные в таблицах (например, мощность потребления от сети, номиналы питающих напряжений и т. п.), определяются по конкретному составу схемы инструмента и в соответствии с аналогичными нормами для других радиоэлектронных приборов с близкими режимами эксплуатации.

Условия применения нормализованных элементов схемы и конструкции, а также нормы механических нагрузок для ЭМИ должны устанавливаться на основании ГОСТ, нормалей и других документов, обязательных для радиоэлектронной аппаратуры культурно-бытового назначения.

Необходимо отметить, что уровень характеристик, приведенных в табл. 7 и 8, имеет различную степень перспективности. Это особенно относится к уровню эксплуатационных характеристик и в первую очередь — к допустимому весу конструкции.

По мере общего развития техники будут появляться новые возможности к миниатюризации блоков и повышению эффективности таких элементов, как, например, громкоговорители. Эффективность акустических систем ЭМИ имеет определяющее значение для мощности выходных усилителей, а следовательно, систем питания и веса всей конструкции ЭМИ.

В некоторых случаях значительный выигрыш в весе может быть получен за счет применения специальных громкоговорителей (например, с коротким рупором), обеспечивающих высокую отдачу в допустимо узком звуковысотном диапазоне.

В табл. 7 и 8 приведены весовые и другие характеристики в основном для инструментов концертно-эстрадного типа при сетевом питании. Значительные отклонения от этих норм могут быть допущены в случае выполнения ЭМИ переносного типа с автономным питанием, для которых специфически изменятся и многие признаки конструкции.

ЭТАПЫ РАЗРАБОТКИ

Когда класс и конкретные характеристики ЭМИ обоснованы и установлены, необходимо составить его функциональную схему с детальной расшифровкой коммутации функциональных блоков. При этом определяется (выявляется) большинство узлов и механизмов управления цепями электрической схемы, органы настройки, переключения, управления. Что касается самой электрической схемы, то ее разработка представляет собой определенный этап конкретизации разработанной до этого функциональной схемы.

Для многих функциональных элементов конкретные электрические схемы могут быть заимствованы из материалов предшествующих глав. В отдельных случаях может потребоваться отработка специального вида или варианта электрической схемы функционального блока, требования к которому будут вытекать из особых требований к характеристикам данного ЭМИ. Иногда проработка таких схемных фрагментов может предшествовать этапу формулировки технических требований к ЭМИ, поскольку заранее может быть неизвестен возможный уровень характеристик того или иного функционального блока, влияющий на уровень характеристик ЭМИ в целом.

Чтобы создать полноценный образец ЭМИ, необходимо предварительно выполнить его комплексный макет, на котором представляется возможность провести конкретную стыковку функциональных элементов и блоков, произвести оптимизацию и увязку режимов, а также уяснить реальность поставленных требований к разработке и откорректировать ее направление, уточнить ранее заданные характеристики.

После того как создан опытный образец ЭМИ, важно оценить его качество путем проверки в реальных условиях, под которыми в данном случае следует понимать опыт музыкально-исполнительского освоения. Новый ЭМИ может только тогда быть признан успешно законченным, когда на нем будет квалифицированно продемонстрирована музыкальная программа, отражающая все его основные (предусмотренные разработчиком) музыкальные возможности на произведениях соответствующего содержания.

Конструктор ЭМИ, как бы он ни был сам удовлетворен созданным им образцом, всегда должен помнить, что его работа превратится в самоцель, если не найдет признания музыкантов в чисто практическом плане, хотя бы в пределах того или иного жанра.

В книге рассматривались музыкально-технические основы, главные вопросы техники и конструирования ЭМИ на их современном уровне. Поскольку понятие современности в области электроники быстро меняет свое содержание, очевидно, что чисто технический материал данной работы потребует уже в ближайшем будущем известной корректировки, в то время как описанные принципиальные и технологические основы получения музыкальных звуков электронными средствами и приемы их музыкального управления могут претендовать на более длительное существование.

Несомненно, что многие частные вопросы и решения, относящиеся к описанным проблемам, остались за рамками настоящего относительно краткого обзора. Поскольку автор надеется в будущем подготовить новую, более подробную редакцию данной работы, он будет весьма признателен читателям за критические замечания и пожелания, которые они найдут возможным сообщить ему через издательство

ОГЛАВЛЕНИЕ